

水力驱动控制棒极限落棒冷态原理实验

王金华, 薄涵亮, 郑文祥, 姜胜耀, 刘志勇, 李军, 郑艳华

(清华大学核能技术设计研究院, 北京 100084)

摘要:针对控制棒水力驱动系统在摩擦力卡棒和倒置等极限工况下的停堆问题, 根据控制棒水力驱动系统的工作原理, 提出了步进缸内腔卸压的解决方法, 并在 200 MW 低温核供热堆控制棒水力驱动系统的 1:1 实验台架上进行了冷态实验。结果表明:控制棒的落棒速度明显提高, 棒外与棒内差压在卸压一定时间后能够达到较高的数值。说明水力驱动控制棒在冷态摩擦力卡棒和倒置等极限条件下, 能够克服一定量的摩擦阻力或能够克服重力插入堆芯。

关键词:低温核供热堆; 控制棒水力驱动系统; 落棒; 极限事故

中图分类号: TL334; TL351.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2003)02-0157-05

Experiments on Scram for Hydraulic Control Rod Driving System in Utmost Accident at Normal Temperature

WANG Jinhua, BO Hanliang, ZHENG Wenxiang, JIANG Shengyao,

LIU Zhiyong, LI Jun, ZHENG Yanhua

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

Abstract: Based on the principle of hydraulic control rod driving system (HCRDS), the paper gives a new scram method, which makes the inside pressure of step cylinder discharge, to solve the scram problem of HCRDS in control rod hang up accident and inversion conditions, and some experiments were carried out with the 1:1 experimental loop of the HCRDS for the 200 MW nuclear heating reactor (NHR-200). The results show that the control rod falls much quickly than that in normal condition. The differential pressure between the outside and inside of step cylinder can reach a large value after the inside pressure of step cylinder discharge. In other word, the hydraulic control rod, which can overcome certain frictional resistance in control rod hang up accident of its gravity in inversion condition, can insert the nuclear reactor core.

Key words: nuclear heating reactor; hydraulic control rod driving system; scram; utmost accident

收稿日期: 2002-01-28; 修回日期: 2002-04-20

基金项目: 国家 985 项目 (985-08-05-014)

作者简介: 王金华 (1977—), 男, 山东潍坊人, 在读博士研究生, 核能科学与工程专业

低温核供热堆是一种具有良好安全特性的反应堆。它采用壳式、一体化、自然循环和自稳压的方案设计,且采用控制棒水力驱动系统。驱动系统是依据流体动压原理设计的一种新型控制棒驱动机构,具有全内置无弹棒事故、传动线短、运动部件结构简单、驱动系统事故安全停堆等特点。低温核供热堆的推广应用,为控制棒水力驱动系统的发展提出新的研究课题:需要考虑在发生摩擦力卡棒事故时控制棒的落棒能力,以确保反应堆安全停闭;若将核供热堆应用到船舶上作为移动式核能海水淡化装置,还需考虑在船舶倾覆时把控制棒紧急插入堆芯的方法,以确保反应堆及时停闭等。

1 极限落棒

控制棒水力驱动系统由步进缸、循环泵和组合阀组成^[1](图1)。其中:组合阀包括上升电磁阀、下降电磁阀、脉冲缸、保持流量阻力节、下降阻力节和回零阻力节等部件;步进缸根据浮子流量计的原理设计而成,由内套、外套和中子吸收体组成。步进缸的外套与吸收体固接在一起,沿固定在堆芯下格板上的内套上下运动。水从压力容器中引出,经循环泵加压后,通过组合阀进入步进缸,再经步进缸外套对孔流回压力容器。通过控制组合阀动作输出恒定流量或脉冲流量来驱动控制棒步升、步降和快速落棒^[2]。

根据控制棒水力驱动系统工作原理,在发生摩擦力卡棒(外套和吸收体所受的摩擦力大于其重力)和倒置等工况下,控制棒无法靠重力落入堆芯,必须采取相应的措施,才能使控制棒落入堆芯,这种工况下的落棒称为极限落棒。此时采取的措施是使步进缸内腔卸压,靠压力容器系统内的高压驱动步进缸外套插入堆芯。即在组合阀出口和步进缸进口之间增加一电磁常开阀,其后加入卸压管直通卸压箱,卸压管上安装一电磁常闭阀,卸压箱可与大气相通或不通。正常运行时,电磁常开阀打开,电磁常闭阀关闭,控制棒水力驱动系统维持正常运行;极限落棒时,同时关闭电磁常开阀,打开电磁常闭阀,使步进缸内腔与卸压箱相通,卸压箱的绝对压力为一个大气压。由于步进缸内腔与卸压箱之间差压非常大,步进缸内的水快速流入卸压箱,步进缸内腔的压力快速降低。此时,压力容

器内的压力基本维持 2.5 MPa,这样,在棒外与棒内间产生很大的差压,步进缸外套在差压力的作用下将能够克服一定量的摩擦力,或能够克服重力而插入堆芯。

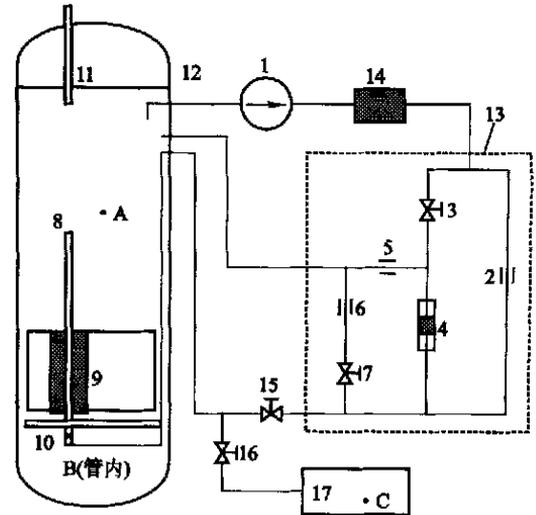


图1 极限落棒实验装置(HCRDS)示意图

Fig. 1 Schematic diagram

of hydraulic control rod driving system

- 1—循环泵;2,5,6—阻力节;3—上升阀;
4—脉冲缸;7—下降阀;8—步进缸;
9—堆芯;10—堆芯下格板;11—棒位测量;
12—压力容器;13—组合阀;14—过滤器;
15—常开阀;16—常闭阀;17—卸压箱
棒外与棒内差压为AB点差压;
卸压箱沿程差压为BC点差压;
卸压箱与大气差压为C点与系统外大气差压

2 实验装置

极限落棒实验装置由200 MW低温核供热堆控制棒水力驱动系统的1:1实验台架^[3]改建而成。整个回路系统仍采用原有回路,控制棒为200 MW堆控制棒样机,仅增加了卸压系统,即电磁常开阀、电磁常闭阀和卸压箱。

实验装置的测量系统由计算机、一次传感器、二次仪表和显示仪表等组成,监视并记录实验系统压力、运行温度、棒外与棒内差压、步进缸入口与卸压箱差压、卸压箱与大气差压和控制棒棒位等参数变化,同时监视、记录实验回路的运行状态参数。装置设有动态快速测量系统,其测量是一个12 s采样3 000点的瞬态过程。采样参数包括:棒位,棒外与棒内差压和卸压箱与大气差压;棒外与棒内差压,卸压水管沿

程差压和卸压箱与大气差压。动态快速测量能够完整地记录极限落棒动态过程。经分析^[4], 实验中差压的最大测量误差为 0.4%, 棒位的最大测量误差为 ±1 mm。

3 实验结果分析

温度为 44 和 50、卸压水箱与大气不通及温度为 57 和 60、卸压水箱与大气相通 4 种工况下的实验结果示于图 2。由图 2 可看出:冷态极限落棒的全过程可分为落棒前状态、落棒过程和落棒后状态 3 个阶段。

3.1 落棒前状态

系统处于棒保持状态,各参数保持不变。棒位处在第 41 步的位置上;棒外与棒内差压为 -0.24 MPa,这主要是由于步进缸外套处于平衡状态时,必须克服其自身的重力作用;卸压箱与大气间的差压为 0 MPa;卸压水管沿程差压为 2.74 MPa。

3.2 落棒过程

电磁常开阀关闭、电磁常闭阀打开,控制棒从 41 步下落到 0 步(机械零位)。落棒开始时,棒外与棒内差压快速增大,且增大的速度逐渐

降低,在达到某一最大值后,棒外与棒内差压则缓慢减小,并出现负值,且减小的速度缓慢降低,直到落棒结束;卸压水管沿程差压快速降低,落棒结束时仍具有一定的数值;卸压箱与大气间的差压略有升高,但升高的幅度很小,几乎察觉不到变化。

落棒开始时,步进缸内腔压力降低,使棒外与棒内差压由负值逐渐增大为正值,卸压的驱动压头同时随之减小,内腔卸压速度放慢;另外,步进缸外套的下落使得内腔体积不断缩小,内腔的水受到外套下落运动的挤压作用。在落棒的开始阶段,步进缸内腔的卸压作用强于外套运动对内腔水的挤压作用,使步进缸内腔的压力逐渐减小,棒外与棒内差压逐渐增大;当卸压作用与外套运动对内腔水的挤压作用相当而相互抵消时,棒外与棒内差压达到最大值;此后,由于控制棒的速度已达到较高的数值,外套运动对内腔水的挤压作用逐渐强于步进缸内腔的卸压作用,使步进缸内腔的压力逐渐减小,甚至出现负值,直到落棒结束。步进缸缸内压力大于缸外压力,但仍小于步进缸平衡状态的差压,因有重力作用,步进缸外套仍会继续下落。

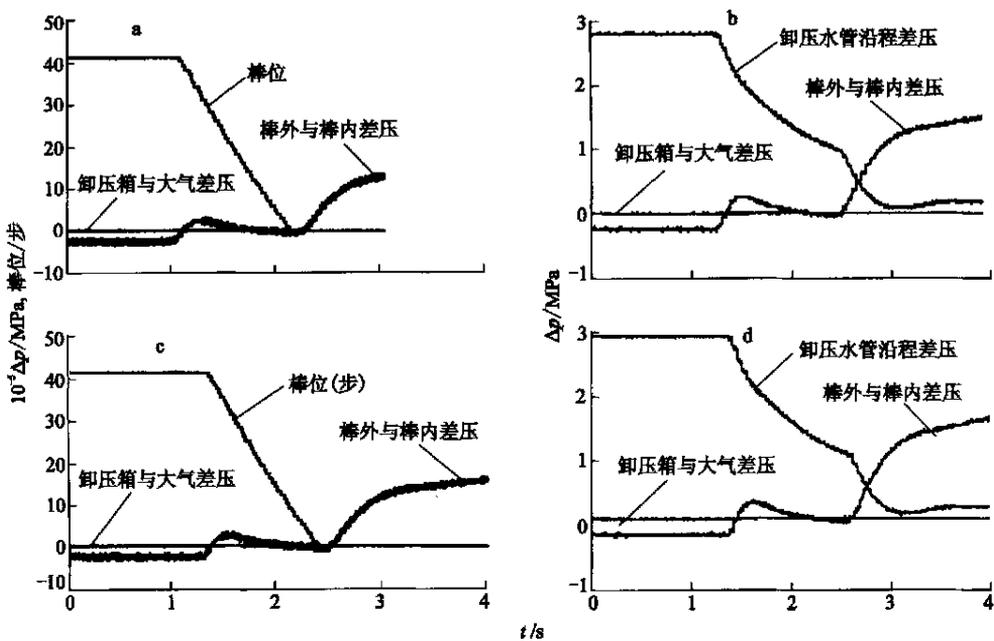


图 2 极限落棒实验曲线

Fig. 2 Experimental curves

卸压箱与大气连通状态:a——不通(44);b——不通(50);c——相通(57);d——相通(60)

卸压水管沿程差压是步进缸进口与卸压箱之间的差压,在落棒状态,常闭阀打开,所以,卸压水管沿程差压快速降低。落棒结束时,步进缸缸内仍在卸压,卸压水管沿程差压仍将维持在一定数值上。由于棒外与棒内差压的一部分转换为步进缸运动的动能,因此,棒外与棒内差压、卸压水管沿程差压和卸压箱与大气间的差压并不形成封闭的差压链。

3.3 落棒后状态

控制棒棒位位于第0步(机械零位),棒外与棒内差压快速增大,且增大的速度逐渐减小,并在达到某一最大值后缓慢下降;卸压水管沿程差压快速降低,降低速度比落棒状态快,有一个明显的拐点。其降低的速度随时间逐渐减小,并在达到一个最小值后,缓慢回升,回升后又缓慢减小。卸压箱与大气间的差压略有升高,但升高的幅度依然很小,几乎看不到变化。

落棒结束后,步进缸内腔的体积不再受外套下落的影响,外套下落的挤压作用已不复存在,压力变化仅取决于其内腔的卸压速度。由于步进缸内腔的压力仍然很高,接近于落棒开始时的数值,因此,其卸压速度仍然很快。压力的下降引起卸压驱动压头的降低,导致步进缸内腔的卸压速度不断下降,而压力容器压力变化较小,这就形成了棒外与棒内差压在落棒后不断增加,且增加的速度逐渐减小,并在达到某一最大值后缓慢减小;卸压水管沿程差压快速降低,降低速度比落棒状态快。步进缸上的排气孔和内外套对孔以及迷宫处有一定的泄漏,它造成了压力容器压力缓慢下降,使棒外与棒内差压在达到某一最大值后缓慢下降,卸压水管沿程差压回升后又缓慢减小。

比较卸压箱与大气相通和不通的实验数据可以看到,相通和不通对实验结果几乎没有影响。相通时,卸压箱与大气压差几乎不变;不通时,卸压箱压力略有升高,但几乎察觉不出,可以忽略。卸压箱的体积为 0.35 m^3 ,整个卸压过程排入卸压箱的水量为 2.5 L ,根据气体状态方程,卸压箱的压力升高为 0.72 kPa ,与卸压箱压力 0.1 MPa 相比,仍然很小。

从实验结果可看到:步进缸内腔卸压方法的采用,获得了更短的落棒时间(约 1 s),正常情况下,开阀落棒时间为 4.5 s ,开阀停泵落棒

时间为 2.5 s 。落棒速度大为提高。

控制棒棒位位于第0步(机械零位),温度为 42°C 、卸压水箱与大气不通以及温度为 49°C 、卸压水箱与大气相通两种工况下极限落棒实验结果示于图3。由图3可看出:在两种工况下,步进缸内腔的卸压速度均很快。当卸压水箱与大气不通时,在 0.8 s 的时间内,卸压水管沿程差压由 2.76 降到 0.24 MPa ,同时,棒外与棒内差压由 -0.24 上升到 1.94 MPa ,并在此后 10 s 的时间内降到 1.65 MPa ,当卸压水箱与大气相通时,在 0.6 s 的时间内,卸压水管沿程差压由 2.83 降到 0.25 MPa ,同时,棒外与棒内差压由 -0.24 上升到 2.0 MPa ,并在此后 10 s 的时间内降到 0.88 MPa 。这与图2b、c中的落棒后状态相似。

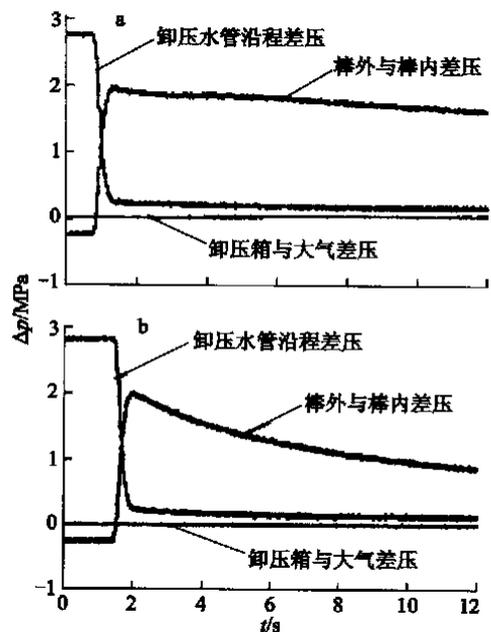


图3 步进缸内腔卸压曲线

Fig. 3 Experimental pressure discharge curves
卸压箱与大气连通状态:a——不通(42°C);
b——相通(41°C)

控制棒在某一步位上保持平衡时,其棒外与棒内差压为 -0.24 MPa ,即平衡其重力的棒外与棒内差压为 -0.24 MPa 。若控制棒倒置,则需 0.24 MPa 的棒外与棒内差压才能与重力相平衡而使步进缸保持在原有步位上。步进缸内腔卸压方法的采用至少能够获得 0.88 MPa 的棒外与棒内差压,且维持 10 s ,即获得两倍以

上平衡重力的推动力。如果控制棒摩擦力卡棒,那么,该方法将能克服至少两倍平衡重力的摩擦力;如果控制棒倒置,将有一倍平衡重力的推动力作用在步进缸外套上,推动步进缸外套向上运动。

4 结论

1) 步进缸内腔卸压方法可以明显提高控制棒落棒速度。

2) 获得了步进缸内腔卸压方法冷态落棒的动态过程,揭示了其冷态落棒过程的机理,为进一步进行其理论分析奠定了基础。

3) 卸压箱与大气相通与否对冷态实验结果几乎没有影响。

4) 在冷态工况下,步进缸内腔卸压方法对解决摩擦力卡棒和倒置等极限工况下的落棒问题是可行的,这使控制棒能够克服一定量的摩擦力,或能够克服重力而插入堆芯。有关热态工况下的步进缸内腔卸压方法还需进行大量的研究工作。另外,步进缸内腔卸压方法对反应

堆可能产生的影响还需作进一步的研究分析。

参考文献:

- [1] Bo Hanliang, Zheng Wenxiang, Dong Duo. Studies on the Performance of the Hydraulic Control Rod Drive for the NHR-200 [J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 195: 117 ~ 121.
- [2] Chi Zongbo, Wu Yuanqiang, Chen Yunxia, et al. Study and Design of Hydraulic Driving System of Control Rod [J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(1): 58 ~ 62. (in Chinese)
- [3] Bo Hanliang, Chi Zongbo, Li Dezhong, et al. Experimental Study on the Performance and Life Span of Hydraulic Control Rod Driving System for NHR-200 [R]. Beijing: Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, 1998. (in Chinese)
- [4] Bo Hanliang, Zhang Youjie, Zhang Yutang. The Control and Measure System of the Experimental Loop of Hydraulic Control Rod Driving System for NHR-200 [R]. Beijing: Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, 1998. (in Chinese)

前沿核物理学

Nuclear Physics at Border Lines

编者: Giovanni Fazio。2002年世界科学出版社出版。

《前沿核物理学》国际会议于2001年5月21~24日在意大利的利伯里群岛召开。有来自15个国家的150多位科学家参加了会议,并应邀在大会上发言,或在分组会议上作报告。本书收集了与会者所有的讲稿,是该会议的论文集。

大会旨在重点介绍前沿核物理学的研究情况。这是一个利用新的实验技术和理论方法拓展核物理学研究的领域。大会的学术内容为以下4个方面:1) 导致超重元素形成的重核间的反应;2) 放射性束与富中子系统;3) 奇异核与核天体物理学;4) 新的核物质状态。

目次如下:

用直接反应研究奇异核; $^{58}\text{Fe} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{306}(122)$ 反应的研究;Sd壳中的富中子核的基态特性;裂变碎片角分布的动力学模型;四级裂变;极端同位旋的多体理论;超重元素的平均场计算;探测多体晕环中的相关关系;超重核的结构与特性;复合核的衰变;重核-核系统的统计衰变。

摘自中国原子能科学研究院《科技信息》