

铀溶液核临界安全实验装置首次物理启动

朱庆福,史永谦,沈雷生,胡定胜,赵守智,何涛,孙征,林生活,姚世贵

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所,北京 102413)

摘要:介绍了用于核临界安全问题研究的铀溶液实验装置,给出了在活性区全水反射层情况下首次物理启动时的核燃料装料步骤。用外推法、内插法、功率稳定法实验测定的硝酸铀酰溶液的临界体积为 20 479. 62 mL,从而给出²³⁵U 的临界质量为 1 579. 184 g。最后给出控制棒价值的实验刻度等。

关键词:铀溶液;物理启动;外推法;内插法;控制棒价值

中图分类号: TL375. 12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2005)04-0293-03

First Start-Up of Nuclear Criticality Safety Experiment Facility for Uranyl Nitrate Solution

ZHU Qing-fu, SHI Yong-qian, SHEN Lei-sheng, HU Ding-sheng, ZHAO Shou-zhi, HE Tao, SUN Zheng, LIN Sheng-huo, YAO Shi-gui

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-45, Beijing 102413, China)

Abstract: The uranyl nitrate solution experiment facility for the research on nuclear criticality safety is described. The nuclear fuel loading steps in the first start-up for water-reflected core are presented. During the experiments, the critical volume of uranyl nitrate solution was determined as 20 479. 62 mL with count rate inverse extrapolation method, reactivity interpolation method, and steady power method. By calculation, critical mass of ²³⁵U was derived as 1 579. 184 g from experimental data. The worth of control rods was also calibrated in the first start-up of the facility.

Key words: uranyl nitrate solution; start-up; count rate inverse extrapolation method; reactivity interpolation method; worth of control rods

核临界安全是核工业的特殊安全问题,解决临界安全问题的基础是临界实验数据。但由于核工业中遇到的系统种类多种多样,有的系统实验模拟相当困难。所以发展反应堆理论,用理论计算方法解决临界安全问题,成为常用手段。但理论计算方法及其所用的核参数是建

立在实验基础上的,只有在经过相关的临界实验验证知道其偏差范围后,才可用于临界安全设计计算,解决工程上的实际问题。

为在保证安全的同时提高经济性,提供核临界安全实验数据已成为迫切的实际需求。在此现实背景下我们建造了本临界实验装置并首

收稿日期:2005-03-15;修回日期:2005-05-21

作者简介:朱庆福(1973—),男,河北献县人,助理研究员,反应堆物理专业

次进行物理启动。

1 实验装置简介^[1]

铀溶液核临界安全实验装置是我国首座用于核临界安全研究,以硝酸铀酰溶液为核燃料的实验装置。实验装置活性区内的硝酸铀酰溶液内可含或不含中子吸收体,活性区周围可有或无水反射层,在以上4种条件下,对不同硝酸铀酰溶液浓度进行实验研究。实验装置包括试验容器活性区,核燃料溶液输送系统,气体回路系统,反射层水系统,中子源进出系统,控制、保护系统,液位测量系统,中子测量系统等。

2 实验方法和实验步骤^[2]

首次临界实验在²³⁵U浓度为77.11 g/L、有水反射层和溶液内无中子吸收体的条件下进行。临界实验前,理论计算了临界体积、临界液位高度和液位系数。在装料之前,精确刻度有水反射层堆芯内溶液体积与液位高度之间的关系,以便实验时由临界液位高度得到临界体积。随后刻度了活性区内的水位高度与中子本底计数率的关系曲线,以便在次临界外推实验时外推临界值更准确,临界实验测量更安全^[3]。

2.1 倒数外推确定临界值

当操纵台仪器、仪表和控制保护系统投入工作,各电磁阀门供电,安全棒、控制棒提出活性区外,加入启动中子源和反射层水后,即可向装置的活性区内注入铀溶液。首次物理启动的加料步骤如下:第1次加铀溶液量,按理论计算的临界液位高度值和运行规程规定,将液位计确定在临界液位高度值的1/4高度处,用计量泵通过液体回路直接向活性区注入铀溶液,当溶液液面与液位计指针接触后,计量泵停止工作,然后用3套启动装置的中子计数器计数,并用液位计准确测量液位值;第2次加铀溶液量,按运行规程规定为理论计算的临界液位高度值的1/8,将液位计确定在临界液位高度值的3/8高度处,按第1次加铀溶液方法进行,之后,用3套中子计数器计数,并用液位计准确测量液位高度值。用两次液位下测量的中子计数率的倒数作为纵坐标和对应的液位值作为横坐标,进行倒数外推,外推至中子计数率的倒数为零时的液位高度值即为临界液位。考虑到临界安

全,取3套中子计数器系统外推临界液位值的最小值,作为下一步实验的临界液位高度参考值。在其后的实验中,按照实测液位高度与实验临界液位高度参考值之差的1/2量,向活性区注入铀溶液,重复上述倒数外推方法,当中子有效倍增系数 $k_{\text{eff}} = 0.90$ 时,按照国家颁布的运行规程规定需粗刻控制棒效率,当中子有效倍增系数 $k_{\text{eff}} = 0.95$ 时,需精确刻度控制棒效率,刻度完成后,继续向活性区注入铀溶液,重复上述倒数外推方法,直到中子有效倍增系数 $k_{\text{eff}} = 0.996$ 时,得到最后的外推临界质量。

2.2 周期-反应性法确定临界值

当中子有效倍增系数 $k_{\text{eff}} = 0.996$ 时,可向超临界过渡。放下两根控制棒,在以后向活性区注入铀溶液时,均要通过铀溶液定量添加系统定量地添加,也可用“滴定”形式来控制铀溶液的添加量和添加速率,确保实验的安全。加铀溶液到 $k_{\text{eff}} = 1$ 时,先提出1根控制棒,观测中子计数率,估计周期,若估计周期较短(如小于100 s),可通过微排电磁阀点动排液,如果估计的周期合适,可再提出另1根控制棒,并观测中子计数和测量周期。测出第1个周期 T_1 后,放下2根控制棒。然后根据周期-反应性曲线和理论计算的液位系数,确定第2个周期所要加入活性区的铀溶液的量,提出控制棒,测出第2个周期 T_2 。由周期 T -反应性 ρ 关系得到两次不同液位下所对应的反应性值,以液位高度为横坐标,以反应性为纵坐标,内插到反应性为零($k_{\text{eff}} = 1$)时所对应的液位高度即为周期-反应性内插法的临界液位。

2.3 稳定功率法确定临界值

在临界实验装置超临界时,功率水平按照上升周期增长,当功率增至一定水平时,通过阀径为10 mm的电磁阀微排来调节反应性,使装置达到临界状态,也就是使实验装置运行在 $k_{\text{eff}} = 1$ 的状态,稳定运行5 min后,用液位计准确测量液位高度,此液位高度值即为临界液位。

2.4 液位系数的测定

液位系数定义为 $\partial / \partial h$,即在临界液位附近单位铀溶液液位高度 h 变化所对应的反应性的变化。利用周期法测出不同液位高度 h_i 所对应的 T_i ,根据公式 $\frac{\partial}{\partial h} = \frac{2}{h_2 - h_1}$ 得到液位系数。

2.5 控制棒效率的刻度

首先使用上述方法使实验装置达到临界,测出临界液位高度 h_1 。然后把控制棒加入实验装置的活性区内,测出有控制棒时的临界液位高度 h_2 和液位系数 $\partial / \partial h$,两个临界液位之差为 $h_2 - h_1$,即为控制棒所相当的液位高度,乘以液位系数就是控制棒所相当的反应性,即为控制棒的效率。

3 临界实验测量结果

表1给出了首次临界实验用3种方法得到的铀溶液浓度为77.11 g/L、有水反射层、温度18℃、无吸收体的临界值,同时也给出理论计算值和液位系数。表2给出了控制棒效率的测量结果。

表1 测量的临界值
Table 1 Measured critical values

方法	临界高度/mm	临界体积/mL	²³⁵ U 临界质量/g
外推法	196.360	20 486.53	1 579.717
内插法	196.305	20 479.62	1 579.184
计数率稳定法	196.345	20 484.65	1 579.571
理论计算值	199.9	20 931.38	1 614.019

注:液位系数为 $2.17 \times 10^{-3} \text{ k/k} \cdot \text{mm}^{-1}$

表2 调节棒和安全棒效率的测定结果

Table 2 Determined values of control rods efficiency

控制棒	相当液位高度/mm	相当溶液体积/mL	相当反应性/(k/k)
调节棒	0.85	107.32	1.845×10^{-3}
安全棒	4.65	587.12	10.091×10^{-3}

4 理论计算结果

在铀溶液核临界安全实验装置首次物理启动后,对铀溶液的浓度和成分进行了化学分析,并用蒙特卡罗程序 MCNP 对实验方案进行了理论分析,得到该装置理论分析的临界液位高

度为 199.9 mm、临界体积为 20 931.38 mL 和 ²³⁵U 的临界质量为 1 614.019 g。将实验测量值代入蒙特卡罗程序,计算得到 k_{eff} 为 0.99137 ± 0.00076 。

5 讨论

首次物理启动表明,铀溶液核临界安全实验装置运行方式简便,自动化程度高,启动、停止容易,单次误操作不危及实验装置的安全,具有多种安全保护措施。

首次临界实验在室温常压条件下进行,系统的温度系数约为 10^{-5} ^{-1} 数量级,且室温变化的范围不超过2℃,因此,温度对临界值的影响可忽略。实验装置以铀溶液为核燃料,溶液的不稳定性和反射层的影响对临界质量和溶液液位系数影响较大,给装置首次运行和实验测量带来了很大的难度。尤其在溶液浓度较高时,临界质量较小,而铀溶液的液位系数很大,向超临界过渡时,添加几滴溶液就可使装置达到临界,操作不慎很容易发生短周期事故。由于临界实验前准确刻度了铀溶液体积与液位高度的关系和中子本底计数与液位高度的变化关系,得到的次临界外推临界值准确,铀溶液的添加量采用“滴定”的控制方式,所以保证了首次临界实验的安全进行。首次临界实验采用3种方法确定实验装置的临界质量,最大偏差为0.53 g,实验值与程序计算得到的结果符合较好。总之,如果系统达到了临界,在临界情况下取得的数据,测量误差是很小的,多次重复实验表明,误差不大于0.1%。临界数据的误差主要来源于溶液浓度和²³⁵U富集度分析的误差。

参考文献:

- [1] 史永谦,林生活,姚世贵,等. 铀溶液核临界实验装置[J]. 核动力工程,2002,23(3):72~76.
- [2] 罗璋琳. 实验反应堆物理[M]. 北京:原子能出版社,1987.65~147.
- [3] 何涛,史永谦,朱庆福,等. 在临界实验中本底计数对倒数外推临界的影响[J]. 核动力工程,2003,24(6):501~504.