

中国实验快堆临界试验研究

喻宏, 杨晓燕, 周科源, 陈晓亮, 杨勇, 胡赞, 范振东,
刚直, 赵金坤, 田和春, 李泽华, 赵郁森, 胡定胜
(中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

摘要:中国实验快堆作为我国第1座快堆,于2010年7月21日取得首次净堆临界,完成一系列物理启动试验之后逐步取得冷态临界和热态临界。在临界试验过程中,采用了用控制棒进行临界外推的方法,顺利完成了3个状态的临界外推过程。临界试验的分析结果表明所采用的方法是合理有效的,且针对试验的相关理论计算结果是准确的。首次临界和冷态临界的最终临界状态下控制棒棒位的试验结果与理论计算结果的对比表明,两者符合良好。

关键词:中国实验快堆;首次净堆临界;冷态临界;热态临界

中图分类号:TL32 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2013)S0-0062-04

doi:10.7538/yzk.2013.47.S0.0062

Research of Criticality Test for China Experimental Fast Reactor

YU Hong, YANG Xiao-yan, ZHOU Ke-yuan, CHEN Xiao-liang, YANG Yong,
HU Yun, FAN Zhen-dong, GANG Zhi, ZHAO Jin-kun, TIAN He-chun,
LI Ze-hua, ZHAO Yu-sen, HU Ding-sheng
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-34, Beijing 102413, China)

Abstract: As the first fast reactor in China, the first clean core criticality of China Experimental Fast Reactor (CEFR) was achieved in 21st July, 2010, and then the cold criticality and hot criticality after a series of physical start-up tests were achieved. All the three criticality tests were fulfilled successfully and safely using control rod extrapolation method. Results of the tests testify the effectiveness and reasonability of the method and calculation results used for the tests. The comparison of control rods position between calculation and tests for the clean core and cold criticality shows good agreement.

Key words: China Experimental Fast Reactor; the first clean core criticality; cold criticality; hot criticality

中国实验快堆(CEFR)是我国第1座快堆,于2010年7月21日完成净堆装载并成功取得首次临界。目前,CEFR已完成全部物理

启动试验和部分提升功率试验。

CEFR物理启动过程中包括了3种临界状态,分别是净堆临界、运行装载下冷态临界和运

行装载下热态临界,其中运行装载为首循环运行装载。CEFR 的首循环运行装载堆内燃料组件数为 79,平衡循环运行装载堆内燃料组件数为 81。首次装料试验结果表明,在净堆情况下,CEFR 堆内共装载 72 盒燃料组件。在完成净堆装载情况下的各项物理启动试验后,CEFR 即装入剩余 7 盒燃料组件向首循环运行装载过渡,并依次完成运行装载冷态临界和运行装载热态临界试验。

1 CEFR 临界试验简介

1.1 试验状态

CEFR 的首次临界即净堆临界,是指在钠温为 $(250 \pm 5)^\circ\text{C}$ 时,所有控制棒在顶部位置(可能有个别控制棒插入堆内),用燃料组件分批替换反应堆堆芯的模拟组件,直至反应堆达到临界^[1]。首次临界过程中,首先通过计数率倒数外推法(次临界外推法)逐步完成首次装料得到净堆装载,然后应用超临界内插法测定反应堆的临界棒位,得到净堆临界状态。本文中的首次临界结果即是指应用超临界外推法测定反应堆临界棒位的试验结果。

冷态临界是指在钠温为 $(250 \pm 5)^\circ\text{C}$ 时,在净堆临界的基础上逐步分批添加燃料组件至首炉运行装载(79 盒燃料组件)后,调节控制棒位置使反应堆达临界。此状态下的临界棒位由控制棒外推法和超临界外推法测定。在进行运行装载下冷态临界及热态临界试验前,应先将剩余 7 盒燃料组件装入堆内,在 CEFR 物理启动试验中,7 盒组件在完成净堆装载试验项目后分两批装入。

热态临界是指在运行装载下冷态临界的基础上提升钠温至 $(300 \pm 5)^\circ\text{C}$,调节控制棒位置使反应堆达到临界,此状态下的临界棒位同样使用控制棒外推法和超临界外推法测定。

1.2 试验方法

CEFR 的反应性控制手段为控制棒,堆内有 3 组共 8 盒控制棒组件,分别是 3 盒安全棒组件、3 盒补偿棒组件和 2 盒调节棒组件。3 盒安全棒作为 1 套独立的停堆系统使用,3 盒补偿棒和 2 盒调节棒组件构成另外 1 套停堆系统,并负责实现 CEFR 所有日常的反应性控制任务。在临界试验中,控制棒外推过程也主要

是通过补偿棒和调节棒实现。

CEFR 临界试验中临界棒位均通过使用控制棒外推法和超临界外推法进行测定,具体可分为如下两步。

1) 控制棒外推

在 CEFR 的临界过程中采用补偿棒的临界外推。提升所有安全棒组件到顶,提升所有调节棒到堆芯中平面位置,逐步提升补偿棒组件到不同高度,记录物理启动通道和源量程的计数率并估算 k_{eff} 、外推补偿棒组件的临界棒位。当外推所得的补偿棒临界棒位确定(两次外推所得的临界棒位一致)时,即可向超临界过渡。

2) 超临界外推

首先将所有调节棒降到底端,将补偿棒提升至第 1 步中外推所得的临界棒位处;其次根据调节棒的价值,估算使反应堆能取得一定功率倍周期的调节棒棒位,提升调节棒到该位置,测定计数率并进行周期拟合;最后根据测量结果内插得到调节棒的临界棒位并确认临界。

CEFR 临界试验过程中,共有 7 套中子计数装置,包括 3 个物理启动通道和 4 个源量程通道。

1.3 试验注意事项

CEFR 临界试验中,主要注意事项包括:

- 1) 保证至少两套独立的物理启动中子计数装置记录中子计数率;
- 2) 防止发生短周期事故。

2 临界试验结果分析

2.1 首次临界

首次临界在完成净堆装载后进行。首次装料试验中,外推所得的净堆临界质量为 71.8 盒燃料组件,最终净堆装载 72 盒燃料组件。结合调节棒价值及单盒燃料组件价值的计算值可知,在首次临界试验中,需进行调节的反应性小于单盒调节棒的价值,无需进行补偿棒的外推临界,可直接向超临界过渡。

因此,在首次临界试验中,直接采用 2# 调节棒 RE2,向超临界过渡。

利用调节棒向超临界过渡的结果列于表 1。

表 1 的结果表明,CEFR 的首次临界试验中 I B 和 II B 通道的测量结果符合较好,外推所得的临界棒位偏差仅约 2 mm,并且反应堆安全、顺利地达到临界,整个试验满足试验要求和

验收准则。其余 5 个通道得到相同的结果。

对于净堆装载的临界计算,理论计算所得的临界棒位为 80 mm,与试验结果相比,仅约 10 mm 的调节棒棒位偏差,其反应性偏差小于 5 pcm。另外,考虑到试验条件下一回路冷却剂温度仅约为 245 °C,与计算条件的 250 °C 冷态有 5 °C 的偏差,引入一定的反应性偏差。因此,根据临界棒位和一回路的冷却剂温度的偏差,结合 CEFR 的设计分析,对于首次净堆临界,理论计算与试验的偏差约为 10 pcm,符合较好。

表 1 首次临界调节棒临界棒位内插数据
(堆外源量程 I B 和 II B 通道)^[2]

Table 1 Interpolation of regulating rod
for the first criticality (source range I B and II B)^[2]

棒位/ mm	I B		II B	
	周期 T/s	k_{eff}	周期 T/s	k_{eff}
151	232	1.000 25	218	1.000 25
170	162.00	1.000 34	154	1.000 34
190	134.00	1.000 40	139	1.000 40
临界棒位, mm	70		68	

注:临界棒位是指控制棒活性段底部距堆芯活性段底部的距离

另外,在向超临界过渡的过程中,所采用的控制棒价值、积分曲线和微分曲线等均由 NAS 计算得到,也进一步表明 CEFR 的主要设计软件具有较高的精确度。

2.2 冷态临界

运行装载情况下堆内的燃料组件数目为 79,因此,与首次临界相比,反应堆的剩余反应性增大,在临界试验过程中,需首先进行控制棒的临界外推。运行装载冷态临界试验的控制棒外推过程如图 1 所示。

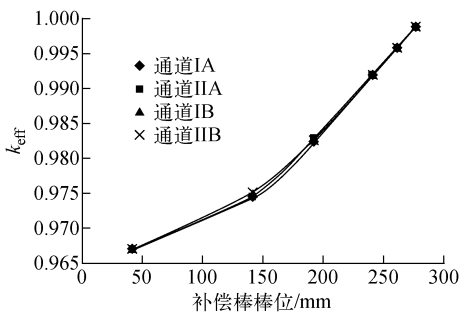


图 1 补偿棒外推有效增殖因数 k_{eff} 估计(源量程)^[3]

Fig. 1 k_{eff} of control rod extrapolation (source range)^[3]

图 1 表明,在控制棒外推过程中,4 个源量程通道的结果符合良好,在外推末期收敛到相同的棒位值。其余 3 个物理启动通道也得到相同的结果。

表 2 以源量程通道 II A 和 II B 为例列出了运行装载冷态临界过程中采用调节棒进行超临界内插的试验结果,不同通道间的结果符合良好。

表 2 冷态临界调节棒临界棒位
内插试验数据(源量程 II A 和 II B)^[3]

Table 2 Interpolation of regulating rod
for cold criticality (source range II A and II B)^[3]

调节棒棒位/mm		周期 T/s	
1 #	2 #	通道 II A	通道 II B
314	312	139	140
327	329	100	100
273	272	>500	>500

表 3 进一步列出了冷态临界时的堆芯状态参数,并给出相应的 NAS 程序的计算结果。考虑到临界棒位及一回路的冷却剂温度的差别,结合由理论计算所得的控制棒价值和温度反应性系数,理论计算结果与试验结果的偏差约为 5 pcm,两者符合较好。

表 3 冷态临界堆芯参数^[3]

Table 3 Core parameters of cold criticality^[3]

参数	数值	
	试验	NAS 程序
一回路的冷却剂温度, °C	245	250
冷态临界棒位, mm		
安全棒(1 # / 2 # / 3 #)	提出堆外	提出堆外
补偿棒(1 # / 2 # / 3 #)	241/240/242	243/243/243
调节棒(1 # / 2 #)	230/231	223/223

2.3 热态临界

运行转载热态临界是指初始运行装载、热态钠温情况下的临界状态。热态临界试验超临界内插的结果列于表 4,临界的堆芯参数列于表 5。

热态临界的试验方法等与冷态临界一致,试验结果表明,反应堆安全、顺利地达到了运行装载下的热态临界,数据测量结果可靠,不同通道间结果符合良好。

2.4 主要误差来源

在 CEFR 的首次临界过程中,尚未完成控

制棒价值的刻度,在采用调节棒向超临界过渡的过程中,所采用的控制棒价值、积分曲线和微分曲线等均由快堆中子学分析软件 NAS(原 HND 程序)提供。

表 4 热态临界调节棒临界棒位
内插试验数据(源量程 II A 和 II B)^[4]

Table 4 Interpolation of regulating rod
for hot criticality (source range II A and II B)^[4]

调节棒棒位/mm		周期 T/s	
1 #	2 #	通道 II A	通道 II B
308	308	125	126
329	329	80	81
255	256	>500	>500

表 5 热态临界堆芯参数^[4]

Table 5 Core parameters of hot criticality^[4]

参数	试验值
一回路冷却剂温度,℃	302
冷态临界棒位,mm	
安全棒(1#/2#/3#)	提出堆外
补偿棒(1#/2#/3#)	257/257/257
调节棒(1#/2#)	213/214

因此,首次临界的误差来源主要有如下几项:1)计数率误差;2)控制棒棒位的测量误差,即采用调节棒向超临界过渡以进行超临界内插过程中,需要对 2# 调节棒进行多次提升和下降操作,反复的棒位测量也会引入一定的误差;3)理论计算所得的控制棒价值与实际控制棒价值之间的误差,即采用调节棒向超临界过渡以进行超临界内插过程中,所采用的调节棒价值及价值曲线由 NAS 程序计算给出,会引入一定的误差。

在进行冷态临界试验时,已完成首次临界控制棒价值的刻度,外推过程中同时参考了理论计算值和试验值,因此,冷态临界的误差来源主要有如下几项:1)计数率误差;2)控制棒棒位的测量误差,包括所有的补偿棒和所有的调节棒;3)控制棒价值理论计算值与实际控制棒价值之间的误差;4)首次临界控制棒价值刻度

值与控制棒实际价值之间的误差。

在进行热态临界试验时,已完成运行装载冷态控制棒价值的测量,外推过程中的控制棒价值采用了冷态情况下刻度得到的控制棒价值,因此,热态临界的误差来源主要有如下几项:1)计数率误差;2)控制棒棒位的测量误差,包括所有的补偿棒和所有的调节棒;3)运行装载冷态控制棒价值的测量误差;4)热态堆芯情况下采用冷态控制棒价值所引起的误差。

3 小结

本文简单介绍了 CEFR 的临界(包括首次临界、冷态临界和热态临界)过程、临界试验结果及与部分理论计算结果的对比,并进行了简单的误差来源分析。本文中的结果表明:

1) CEFR 的临界试验程序(包括首次临界、冷态临界和热态临界)是合理有效的,可引导反应堆安全、顺利地达到临界状态;

2) 理论计算值(装料的理论计算值和控制棒价值的理论计算值)与试验结果符合较好,CEFR 现有的设计软件可很好地用于 CEFR 的设计及后续计算;

3) 测量过程中几个物理启动通道和源量程通道的正常工作保证了临界过程的顺利进行;

CEFR 的临界试验目的主要是引导反应堆首次达到临界状态,同时校验理论分析结果。本文结果表明 CEFR 的临界试验较好地完成了试验目的。

参考文献:

- [1] 喻宏. 装料和首次临界试验程序:物理启动试验程序[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2009.
- [2] 赵金坤. 装料和首次临界试验结果报告:物理启动试验结果报告[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2010.
- [3] 赵金坤. 运行装载冷态临界试验结果报告:物理启动试验结果报告[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2010.
- [4] 赵金坤. 运行装载热态临界试验结果报告:物理启动试验结果报告[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2010.