

文章编号：0258-0926(2017)05-0001-03；doi:10.13832/j.jnpe.2017.05.0001

红沿河核电厂 1 号机组首次 18 个月 换料启动物理试验分析

张海州，曹云龙

辽宁红沿河核电有限公司，辽宁大连，116001

摘要：红沿河核电厂 1 号机组首次实施了 18 个月换料后启动物理试验。结果表明：18 个月换料理论预计值与实测结果符合良好，验证了堆芯换料设计的准确性。将 18 个月换料与年度换料启动物理试验结果进行了比较，指出 18 个月换料后堆芯特性的变化并进行了分析。

关键词：18 个月换料；启动物理试验

中图分类号：TL375.1 **文献标志码：**A

Analysis for Startup Physics Test of First 18 Months Refueling for Unit 1 of Hongyanhe Nuclear Power Plant

Zhang Haizhou, Cao Yunlong

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co. Ltd., Dalian, Liaoning, 116001, China

Abstract: The start-up physical test of 18-months refueling for unit 1 of Hongyanhe Nuclear Power Plant has completed. The results show that the predicted value of 18-months refueling theory is in good agreement with the measured results. The results verified the accuracy of refueling design. In this paper, the results from the startup physical tests after 18 months refueling and the 12 months refueling were compared, and the changes of core characteristics for 18-months refueling core are pointed out and analyzed.

Key words: 18-months refueling, Start-up physical test

0 前言

红沿河核电厂 1 号机组第 4 循环开始向 18 个月换料过渡。18 个月换料主要是通过增加每次换料组件数，提高组件富集度，并实施低泄漏堆芯装载，从而实现换料周期延长进而达到 18 个月换料或者近似 18 个月换料的目的。该机组第 4 循环启动物理试验从 2016 年 3 月 29 日 1 时 56 分开始，于 29 日 7 时 02 分达到临界状态，随后进行了零功率及升功率物理试验，所有测量结果满足试验验收准则。本文将介绍该机组首次 18 个月换料启动物理试验的理论分析结果并与年度换料结果进行比较分析。

1 堆芯基本信息

该机组第 4 循环开始向 18 个月换料过渡，反应堆额定热功率为 2895 MW。反应堆堆芯由 157 个全 M5 AFA 3G 燃料组件构成：其中有 64 组富集度为 4.45% 的全 M5 AFA3G 新组件，包括 24 组含 8 根钆棒的组件，28 组含 16 根钆棒的组件和 12 组含 20 根钆棒的组件；1 组来自第 1 循环的富集度为 2.4% 的全 M5 AFA3G 组件；4 组来自第 2 循环的富集度为 3.1% 的全 M5 AFA3G 组件；88 组来自第 3 循环的富集度为 3.2% 的全 M5 AFA3G 组件。

堆芯装载采用内外(in-out)低泄漏装载方式；

收稿日期：2016-10-18；修回日期：2017-04-16

作者简介：张海州（1984—），男，工程师，现从事反应堆物理试验工作

新组件装载在堆芯内区；堆芯外围布置旧组件。第 4 循环的自然循环长度（临界硼浓度为 10 mg/kg）为 18504 MW·d/t(U)。

启动物理试验所需理论参数采用 SCIENCE V2 软件包进行计算。SCIENCE V2 软件包广泛用于与 CPR1000 型机组，是成熟的核设计计算程序，计算精度满足工程设计要求。

2 18 个月换料启动物理试验数据分析

2.1 反应堆临界

红沿河核电厂主要通过提棒、稀释、提棒的方式使机组达到临界状态。第一次提棒是将安全棒提至全提状态（225 步），将功率控制棒组按照叠步方式提至全提状态（叠步棒位 615 步），并将温度控制棒（R 棒）提至 170 步，稀释是稀释硼浓度逐渐逼近临界。第二次提棒是上提 R 棒使堆芯达到临界状态。期间通过计数率倒推和逐步减少稀释速率进行次临界监督以防止意外临界控制。本次达临界试验结果为：温度控制棒 199 步，其他棒组全提出堆芯，堆芯一回路硼浓度 1924 mg/kg，与理论计算预期符合。

2.2 临界硼浓度

临界硼浓度测量是测量热态零功率（ARO）下的临界硼浓度，本次试验结果满足验收标准。表 1 给出了本次试验结果，并与年度换料某循环试验结果进行了比较。

18 个月换料后，换料组件数增加且富集度提高，寿期初后备反应性大幅度增加，需要更高的硼浓度以补偿增加的后备反应性，由表 1 可见：18 个月换料后寿期初 ARO 临界硼浓度较年度换料有大幅度提高，与理论预期符合。

表 1 ARO 临界硼浓度设计值与测量值 mg/kg
Table 1 ARO Critical Boron Concentration Designed and Measured mg/kg

换料模式	设计值	测量值	误差	标准
18 个月	1955	1924.2	-30.8	±50
12 个月	1473	1472	-1	±50

2.3 慢化剂温度系数

反应堆堆芯慢化剂温度系数（ α_{mod} ）是表征反应堆固有安全性的重要参数。换料启动物理试验通过测量等温温度系数间接获得慢化剂温度系数。

当反应堆在零功率物理试验的功率范围内稳定运行时，通常认为堆芯内燃料的温度 T_u 和慢化剂温度 T_m 不但是稳定的，而且随功率的变化[功率范围为（ $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ）%FP]。由于堆芯内的温度变化十分缓慢，可认为 T_m 和 T_u 相同。因此，一般将此特定功率范围[（ $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ）%FP]内，由于温度变化引起的反应性改变的温度系数，称作为等温温度系数 α_{iso} 。 α_{iso} 为 α_{mod} 与燃料多普勒温度系数 α_{dop} 之和。

堆芯慢化剂温度系数无法直接测量，一般通过测量等温温度系数和燃料温度系数（理论计算获得）两种效应间接计算得到。表 2 给出了本次等温温度系数试验结果并与年度换料某循环进行了比较。结果表明：理论计算与实测值吻合较好，18 个月换料较年度换料等温温度系数数值上未有明显的变化。

表 2 等温温度系数设计值与测量值 $10^{-5} \text{ } ^{-1}$
Table 2 Isothermal Temperature Coefficient Designed and Measured $10^{-5} \text{ } ^{-1}$

换料模式	控制棒位置	设计值	测量值	误差	标准
18 个月	ARO	-2.24	-2.69	0.45	±3.6
12 个月	ARO	-3.39	-2.045	1.345	±3.6

2.4 硼微分价值

表 3 给出了硼微分价值测量值与计算值，并与年度换料某循环进行了比较。试验结果满足验收准则。18 个月换料后，硼浓度大幅度增加且使用钆棒做为可燃毒物，降低了硼吸收效率使硼微分价值降低。由表 3 可见：18 个月换料后寿期初硼微分价值较年度换料有所降低，与理论预期符合。

表 3 硼微分价值设计值与测量值的比较
Table 3 Comparison of Boron Differential Value of Designed and Measured

换料模式	控制棒位置	设计值/mg·kg ⁻¹	测量值/mg·kg ⁻¹	误差
18 个月	ARO	-7.29	-7.23	0.06
12 个月	ARO	-9.19	-9.85	-0.66

2.5 控制棒积分价值

控制棒价值测量结果见表 4，试验结果满足验收准则。由表 4 可见：18 个月换料后启动物理试验控制棒价值测量试验结果满足±10%的验收标准。

2.6 升功率物理试验

2.6.1 中间量程保护电流值标定 核电厂运行技术规范要求：正常运行期间，堆外核测量系统中间量程的定值，如，功率高报警（C1）、功率高停堆保护（RT）、未能停堆预期瞬变保护（ATWT）分别设置在 20%FP、25%FP、30%FP，而中间量程显示为电流值；不同循环的功率和电流对应关系并不相同，所以每个循环启动升功率物理试验阶段需要标定中间量程保护定值对应的电流值。表 5 给出了中间量程定值标定试验结果，并与年度换料某循环进行了比较。

表 4 控制棒积分价值测量结果

Table 4 Control Rod Integral Value Measurement Results

棒组名称	测量值 1/10 ⁻⁵	测量值 2/10 ⁻⁵	误差/%
SA	530	520.69	-1.76
SB	1044	958.05	-8.23
SC	575	580.29	0.92
SD	668	689.12	3.16
G1	287	288.15	0.35
G2	731	739.82	1.2
N1	883	880.14	-0.32
N2	592	546.99	-7.6
R	1111	1066.4	-4.0

表 5 中间量程定值试验标定结果 10⁻⁴ A

Table 5 Calibration Results of Intermediate Range Calibration Test 10⁻⁴ A

换料方式	中间量程 1 号通道			中间量程 2 号通道		
	C1	RT	ATWT	C1	RT	ATWT
18 个月	3.028	3.837	4.646	3.18	4.023	4.865
12 个月	3.8998	4.882	5.8642	4.0792	5.1117	6.1443

由表 5 可见，18 个月换料中间量程保护定值对应电流值明显降低，表明 18 个月换料后泄漏中子减少；这是由于 18 个月换料装载方案导致。18 个月换料采用低泄漏装载模式，新组件布置在堆芯内部，旧组件布置在堆芯外围，外围组件功率份额降低，而外围组件对泄漏中子贡献较大，从而使中间量程电流值降低。

2.6.2 升功率各功率平台功率分布测量 升功率物理试验设定 30%FP、75%FP、100%FP 功率平台分别进行通量图试验，以验证各功率平台的安全参数和设计参数是否满足验收准则，进而保证堆芯安全。本次试验结果表明：堆芯各参数均满足验收准则，证明了 18 个月换料后堆芯的安全性及本次堆芯设计的正确性。表 6 给了本次试验各功率平台的热点因子 Q^T 、热管因子 F_H 、径向功率峰因子 F_{XY} ，象限倾斜 DA 等参数测量结果，并与年度换料某循环试验结果进行了比较。由表 6 可见：18 个月换料后 F_H 、 Q^T 、 F_{XY} 较年度换料明显变大。

表 6 升功率物理试验结果

Table 6 Enhance Power Physical Test Results

功率/%FP	换料模式	Q^T	F_H	F_{XY}	$DA/\%$
30	18 个月	0.617	1.5256	1.5116	0.67
	12 个月	0.621	1.3676	1.4075	1.08
75	18 个月	1.491	1.4784	1.4760	0.75
	12 个月	1.368	1.3703	1.4075	0.74
100	18 个月	1.987	1.4624	1.4922	0.8
	12 个月	1.74	1.3713	1.4102	0.55

3 结束语

红沿河核电厂 1 号机组第 4 循环是实施 18 个月换料后的首个循环。启动物理试验期间进行的各项试验均满足验收准则，与理论预期符合良好，验证了红沿河核电厂 1 号机组 18 个月换料后堆芯设计的准确性，证明了红沿河核电厂 1 号机组 18 个月换料后堆芯是安全可靠的。由试验结果可见：18 个月换料后寿期初部分堆芯特性相比年度换料发生变化，如 ARO 临界硼浓度增加，硼微分价值降低，泄漏中子减少， Q^T 、 F_H 、 F_{XY} 增加等。

（责任编辑：王中强）