

文章编号: 0258-0926(2014)01-0014-05

采用 TVS-2M 组件的 VVER 堆芯燃料管理研究

王红霞, 徐敏

中国核电工程有限公司, 北京, 100840

摘要: 使用 KASKAD 程序包, 对田湾核电站从首循环开始使用 TVS-2M 组件展开研究, 提出相应的燃料组件设计。以此为基础展开燃料管理研究, 提出 3 个燃料管理方案(年换料方案和两个长周期换料方案)。对每个方案中堆芯的安全参数及其他重要参数进行分析, 结果表明各种安全参数均满足设计要求。长周期的换料方案是从首循环就开始使用 TVS-2M 组件, 并且只经过 2 个循环的过渡, 寿期长度便达到了长周期的要求。长周期换料方案可提高电厂的年均能力因子, 并在整个堆芯寿期内减少大修次数, 因而每年节约 30.8% 的大修费用, 因此电厂的经济效益得以提高。

关键词: TVS-2M 组件; VVER; KASKAD; 长周期; 燃料管理

中图分类号: TL35 文献标志码: A

0 引言

田湾核电站 1 号和 2 号机组将于 2014 年开始逐步向 18 个月燃料循环过渡, 以满足机组大修时间的灵活性要求, 提高年度负荷因子和电厂经济效益。根据俄罗斯参考电厂的经验, 实施长周期换料需采用 TVS-2M 高性能燃料组件。田湾核电站在正式转入过渡循环前, 在 1 号机组第 5 循环装入 6 组 TVS-2M 燃料组件, 将经历第 5 至第 8 循环运行, 以验证新型组件的设计与实际性能, 以及两类组件在堆芯中的相容性。现在 1 号机组运行到第 6 循环的寿期中, 从堆内运行在线测量以及换料大修的组件检查结果来看, TVS-2M 组件的性能得到了充分的验证^[1-2]。

TVS-2M 组件与 AFA 组件相比做了较多改进。主要改进有: 缩短上下管座高度, 增加燃料棒高度, 同时增加芯块外径, 减小了芯块中心孔径, 从而增加燃料装载量; 定位格架与导向管改为焊接方式固定, 提高了燃料组件的结构稳定性; 定位格架与燃料棒的固定方式由线摩擦改为面摩擦, 增加了燃料棒的稳定性; 上下管座结构加以改进, 提高了管座处的热工水力性能。通过上述的改进, 使 TVS-2M 组件设计最大运行时间延长到 40000 h, 燃耗限值提高到 60 MW·d/kg(U)^[1-2]。

田湾核电站 3、4 号机组正在计划从首循环开始使用 TVS-2M 组件, 并且后续循环可能采用长周期的换料模式。因此, 对田湾核电站开展从首循环开始使用 TVS-2M 组件, 并尽快进入长周期燃料循环的研究, 是具有重要意义和实际工程应用价值的。

1 计算程序简介

田湾核电站采用俄罗斯引进的 VVER 堆型, 也随带引进了堆芯计算程序包 KASKAD。KASKAD 程序包主要由三维粗网堆芯计算程序 BIPR-7A、多层二维细网计算程序 PERMAK-A、堆芯装载优化程序 PROROK、组件计算程序 TVS-M、堆芯功率恢复程序 PIR-A 及附加图表程序 ALBUM、热工耦合程序 TEPRO 等^[3]构成。

2 应用 TVS-2M 组件

2.1 设计准则和目标

为保证核电站的安全性, 堆芯核设计必须满足下列设计准则和目标: 焓升因子 K_f 1.6; 燃料棒线功率密度(考虑不确定性) 448 W/cm; 含钐燃料棒线功率密度(考虑不确定性) 360 W/cm; 寿期初、热态零功率、零氙、控制棒全部提出堆芯时的慢化剂温度系数小

收稿日期: 2012-12-11; 修回日期: 2013-08-10

基金项目: 国家国际科技合作专项资助项目(2011DFR60730)

于等于 0；一束最大价值控制棒卡棒情况下，堆芯重返临界温度不大于 120；年换料平衡循环寿期长度约 300 有效满功率天 (EFPD)；长周期平衡循环寿期长度约 480 EFPD；组件的最大比燃料耗 60 MW·d/kg(U)；平衡循环实现低泄漏堆芯装载^[4]；低泄漏堆芯装载是指新燃料组件多数布置在离开堆芯边缘靠近堆芯中心区的位置。

2.2 堆芯描述

VVER-1000 反应堆堆芯共装载了 163 个燃料组件，堆芯活性段高度为 372.6 cm。表 1 给出了堆芯的总体参数。

表 1 堆芯总体参数
Table 1 Core Parameters

参数名	参数值
堆芯燃料件数	163
堆芯高度/cm	372.6
堆芯功率/MWt	3000
功率密度/kW·L ⁻¹	102.4
总流量/m ³ ·h ⁻¹	81600
冷却剂压力/MPa	15.7
冷却剂堆芯入口温度/	291
零功率冷却剂堆芯入口温度/	280

TVS-2M 型燃料组件包括 312 根燃料棒，18 个控制棒导向管，1 个中子温度测量管；共 331 个栅元。燃料组件的布置形状为六边形，组件中心距为 23.6 cm，对边距为 23.51 cm^[4]。

2.3 组件设计

表 2 给出了本文的长周期换料方案中使用到的部分燃料组件种类，其中 W 型和 U 型燃料组件中钆棒的布置方式是来源于文献^[4]，46 型燃料组件是作者自行研究和设计出的，为了满足使用单一燃料富集度的要求。

2.4 堆芯燃料管理

本文给出 3 个燃料管理方案：年换料方案、

长周期方案 1 和长周期方案 2，以满足电厂不同的需求。3 个方案均是在 VVER 反应堆首循环开始使用 TVS-2M 型燃料组件，采用部分低泄漏的装载方式，经过若干循环的过渡，达到平衡循环。3 个燃料管理方案的首循环堆芯装载是一样的(图 1)。年换料平衡循环的中心组件每 3 个循环换一组新料 36G7，图 2 是平衡循环堆芯装载图。

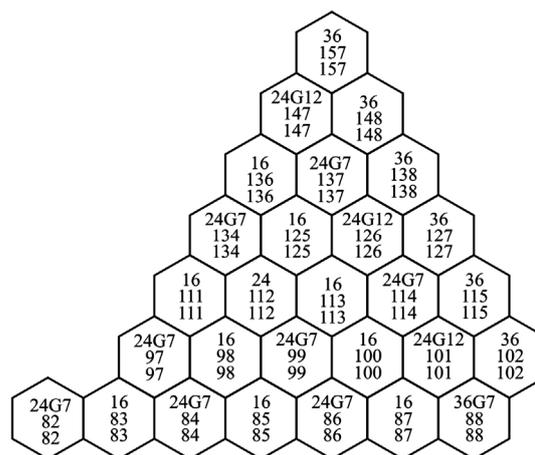


图 1 首循环堆芯装载图 (1/6 区域)

Fig. 1 Cartogram of First Fuel Loading of All Fuel Managements (1/6 Sector)

第 1 行—燃料组件类型；第 2 行—燃料组件在上一循环的位置；第 3 行—堆芯组件编号

长周期方案 1 的平衡循环装载了多种不同富集度的燃料组件，这样的堆芯装载具有非常好的经济性，在堆芯功率展平的同时，高富集度的燃料组件可以达到非常深的燃料耗。中心组件每两个循环换一组新料 U44Z4，可以增加中心组件寿期末的燃料耗裕量，因而可以进行缩短或延伸运行，具有很好的灵活性。图 3 是长周期方案 1 的平衡循环堆芯装载图。

长周期方案 2 的平衡循环装载了单一富集度

表 2 组件类型描述

Table 2 Description of FA Types

燃料组件类型	燃料平均富集度/%	不同燃料棒				含钆燃料棒		
		类型 1		类型 2		棒数	富集度/%	Gd ₂ O ₃ 含量/%
		棒数	富集度/%	棒数	富集度/%			
W39D8	3.884	234	4.0	60	3.6	18	3.3	5
W43E6	4.308	246	4.4	60	4.0	6	3.6	5
U49G6	4.925	306	4.95	—	—	6	3.6	5
U40Y8	3.979	294	4.0	—	—	18	3.6	8
U49Z4	4.855	288	4.95	—	—	24	3.6	8
46-6	4.575	306	4.6	—	—	6	3.6	8
46-18	4.526	294	4.6	—	—	18	3.6	8

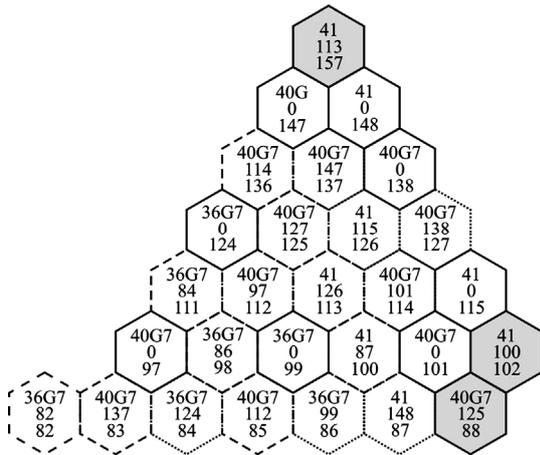


图 2 年换料平衡循环装载图 (1/6 区域)
Fig. 2 Cartogram of Equilibrium Fuel Loading of Yearly Fuel Cycle (1/6 Sector)

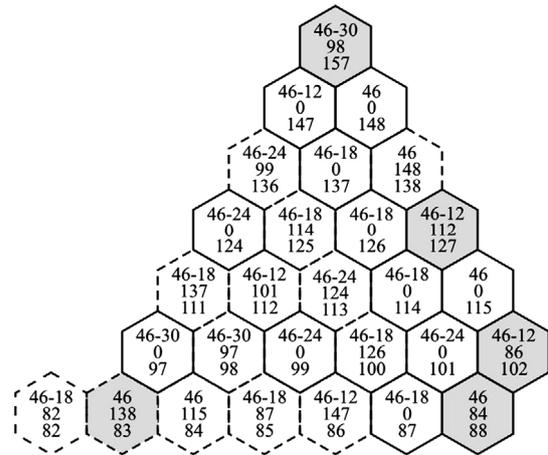


图 4 长周期方案 2 平衡循环装载图 (1/6 区域)
Fig. 4 Cartogram of Equilibrium Fuel Loading of Long Fuel Cycle (1/6 Sector)

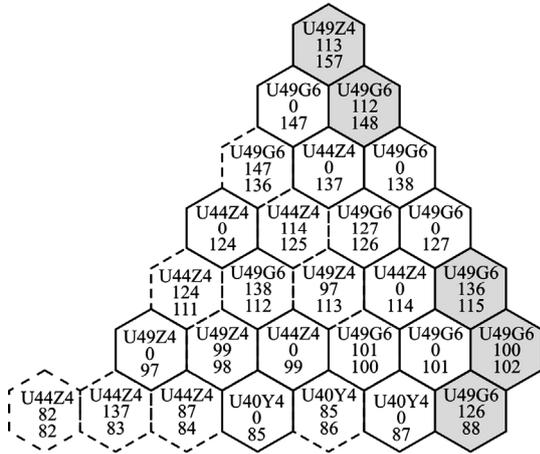


图 3 长周期方案 1 平衡循环装载图 (1/6 区域)
Fig. 3 Cartogram of Equilibrium Fuel loading of Long Fuel Cycle 1 (1/6 Sector)

的燃料组件,只是每一种组件的含钎棒数目不同;这样可以减少燃料制造的困难,增加燃料制造的效率,减少燃料的制造成本,从燃料制造方面看也具有非常好的经济性。中心组件每两个循环换一组新料 46-18,可以增加中心组件寿期末的燃料裕量,具有很好的灵活性。图 4 是长周期方案 2 的平衡循环堆芯装载图。

3 计算结果

3.1 首循环至平衡循环

各循环的燃料计算是在堆芯满功率 (HFP) 工作棒处于 90%、其他控制棒全提的状态下进行,通过调整堆芯硼浓度维持堆芯临界状态,循环寿期末临界硼浓度定为零。计算慢化剂温度系数的堆芯状态是堆芯零功率 (HZN)、控制棒全提

(ARO) 寿期初 (BOL) [5]。

表 3~表 5 分别给出了 3 种燃料管理方案的主要计算结果。各种安全参数满足设计准则,平衡循环的寿期长度满足相应的目标。

3.2 计算结果分析

从表 3 ~ 表 5 可以看出,所有方案的堆芯慢化剂温度系数都为负,卸料组件最大比燃耗都小于比燃耗限值 60 MW·d/kg(U);考虑计算不确定性下燃料棒的线功率密度小于限值 448 W/cm,含钎棒的线功率密度小于限值 360 W/cm。VVER 核电厂的堆芯停堆裕量用重返临界温度来描述:除了最大反应性价值的一束控制棒完全卡死在堆芯外,其余控制棒插入堆芯,堆芯硼浓度、氚和钐浓度保持不变,堆芯平均温度下降至堆芯重新达到临界时的温度,以上所有方案的重返临界温度都小于限值 120。总而言之,所有的安全参数都满足设计准则,平衡循环的寿期长度也达到了设计要求。

运行时间为 T_0 , 大修时间为 T_r , 则年均能力因子为 $T_0/(T_0+T_r)$ 。田湾核电站机组大修时间大约为 40 d, 寿期长度年换料方案平衡循环寿期平均长度 (考虑中心组件) 为 323.4 EFPD, 年均能力因子为 89.0%, 长周期方案 1 平衡循环寿期平均长度 (考虑中心组件) 为 484.2 EFPD, 年均能力因子为 92.4%, 长周期方案 2 平衡循环寿期平均长度 (考虑中心组件) 为 480.5 EFPD, 年均能力因子为 92.3%。可以看出,长周期方案年均能力因子显著增加,因而可以大幅增加电厂的经济效益。

长周期方案 2 的燃料利用率和方案 1 的差不

表 3 燃料管理主要计算结果（年换料）
Table 3 Primary Calculation Results of Fuel Management (Yearly Fuel Cycle)

堆芯参数	循环							
	1	2	3	4	5	6	7	8
装入堆芯新料组件总数目	163	54	49	48	48	49	48	48
新燃料组件 ²³⁵ U 平均富集度/%	2.440	3.781	3.871	3.926	3.926	3.919	3.926	3.926
新燃料组件中含 Gd 棒总数目	559	378	259	252	252	259	252	252
寿期长度/EPFD	325.51	312.30	327.38	316.24	321.01	326.68	321.82	321.64
卸料组件平均燃耗/MW·d·kg ⁻¹ (U)	12.24	25.82	34.45	40.91	42.55	43.69	43.48	43.33
卸料组件最大燃耗/MW·d·kg ⁻¹ (U)	12.39	26.26	40.27	42.21	45.13	46.56	45.51	45.87
最大组件功率峰因子	1.229	1.324	1.334	1.331	1.329	1.344	1.330	1.325
最大燃料棒功率峰因子	1.410	1.454	1.457	1.471	1.483	1.475	1.461	1.468
最大燃料棒线功率密度 /W·cm ⁻¹	379.1	331.3	342.1	343.5	345.4	337.6	339.7	342.7
最大含钐棒线功率密度 /W·cm ⁻¹	255.8	275.9	282.4	282.2	280.1	281.3	280.8	281.1
慢化剂温度系数/10 ⁻⁵	-5.99	-1.52	-0.78	-3.15	-2.93	-1.97	-2.59	-2.71
卡最大价值棒重返临界温度/	37	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20

表 4 燃料管理主要计算结果（长周期方案 1）
Table 4 Primary Calculation Results of Fuel Management (Long Fuel Cycle Loading 1)

堆芯参数	循环							
	1	2	3	4	5	6	7	8
装入堆芯新料组件总数目	163	60	67	66	67	66	67	66
新燃料组件 ²³⁵ U 平均富集度/%	2.440	4.094	4.462	4.569	4.565	4.569	4.565	4.569
新燃料组件中含 Gd 棒总数目	559	792	1242	1152	1176	1152	1176	1152
寿期长度/EPFD	325.51	355.39	455.09	501.4	480.66	482.86	486.59	481.83
卸料组件平均燃耗/MW·d·kg ⁻¹ (U)	12.46	26.06	40.16	42.19	45.70	47.53	47.53	47.33
卸料组件最大燃耗/MW·d·kg ⁻¹ (U)	14.44	29.68	45.54	46.33	52.33	54.68	53.57	53.78
最大组件功率峰因子	1.229	1.325	1.321	1.346	1.352	1.354	1.342	1.352
最大燃料棒功率峰因子	1.41	1.456	1.474	1.484	1.486	1.493	1.491	1.476
最大燃料棒线功率密度 /W·cm ⁻¹	379.1	318.9	343.2	335.5	348.7	342.7	347.0	344.5
最大含钐棒线功率密度 /W·cm ⁻¹	255.8	295.1	293.6	293.6	300.7	291.0	289.1	290.8
慢化剂温度系数/10 ⁻⁵	-5.99	-4.17	-5.84	-0.52	-1.73	-0.95	-1.14	-1.40
卡最大价值棒重返临界温度/	37	58	57	<20	<20	<20	<20	<20

表 5 燃料管理主要计算结果（长周期方案 2）
Table 5 Primary Calculation Results of Fuel Management (Long Fuel Cycle Loading 2)

堆芯参数	循环							
	1	2	3	4	5	6	7	8
装入堆芯新料组件总数目	163	60	61	66	67	66	67	66
新燃料组件 ²³⁵ U 平均富集度/%	2.440	4.094	4.559	4.543	4.550	4.550	4.550	4.550
新燃料组件中含 Gd 棒总数目	559	792	852	1260	1134	1116	1134	1116
寿期长度/EPFD	325.51	355.39	446.92	483.84	484.35	476.73	483.06	477.90
卸料组件平均燃耗/MW·d·kg ⁻¹ (U)	12.46	26.63	38.69	44.42	46.36	47.04	47.14	46.98
卸料组件最大燃耗/MW·d·kg ⁻¹ (U)	14.44	29.68	44.14	53.13	52.32	52.76	52.57	52.47
最大组件功率峰因子	1.229	1.325	1.317	1.291	1.304	1.307	1.302	1.310
最大燃料棒功率峰因子	1.410	1.456	1.444	1.453	1.475	1.461	1.456	1.470
最大燃料棒线功率密度 /W·cm ⁻¹	379.1	318.9	338.4	329.4	353.6	349.9	346.5	352.3
最大含钐棒线功率密度 /W·cm ⁻¹	255.8	295.1	288.5	280.0	279.3	281.3	277.7	282.1
慢化剂温度系数/10 ⁻⁵	-5.99	-4.17	-0.72	-1.56	-1.17	-1.51	-1.10	-1.60
卡最大价值棒重返临界温度/	37	58	<20	<20	<20	<20	<20	<20

注：考虑了不确定性（表 3~表 5）

多,并且采用单一富集度的燃料组件,这样可以减少燃料制造的困难,可以增加燃料制造的效率,从而可以减少燃料的制造成本。降低了组件最高富集度,因此还可以减少新燃料和乏燃料运输时的安全问题。

从表 3~表 5 还可以看出,长周期换料的平均换料组件数更少,但长周期采用的燃料组件平均富集度提高,燃料费用的优劣还需进一步分析。

长周期换料在整个堆芯寿期内减少大修次数,因而长周期换料方案平均每年可以节约 30.8%的大修费用,因此提高了电厂的经济效益。

4 结束语

本文使用 KASKAD 程序包,对 VVER 堆芯采用 TVS-2M 燃料组件的燃料管理进行初步研究和设计,给出了 3 种满足电厂不同寿期需求的方案。每个方案都采用了部分低泄漏的装置方式,堆芯主要安全特性参数都满足设计准则和目标,特别是长周期换料方案具有很好的机动性,也具

有相当的经济性。长周期的换料方案是从首循环就开始使用 TVS-2M 组件,并且只经过 2 个循环的过渡,寿期长度便达到了长周期的要求,该研究成果可以提高电厂的年均能力因子,节约大修费用,从而显著提高电厂的经济效益。

参考文献:

- [1] 李友谊,杨晓强,李文双,等.田湾核电站堆芯燃料管理简介[C].西安:第十三届反应堆数值计算与粒子输运学术会议暨 2010 年反应堆物理会议论文集,2010.
- [2] 李友谊,杨晓强,李文双,等.田湾核电站 1 号机组第 6 循环堆芯装载策略及验证[J].原子能科学技术,2013,47:160-163.
- [3] Kaskad Application Framework User Manual Code Description [R].Moscow: KURCHATOV INSTITUE,2006.
- [4] Calculation of Neutron Physics Characteristics of Transient Fuel Cycles, Beginning from the 8th Fuel Cycle, with Reaching the Equilibrium Fuel Cycle of TNPS, Units 1&2 (Version B) [R].Russia: NATIONAL RESEARCH CENTRE "KURCHATOV INSTITUE",2011.
- [5] 谢仲生.核反应堆物理分析[M].北京:原子能出版社,2005.

Research of Core Fuel Management Using TVS-2M Fuel Assemblies in VVER

Wang Hongxia, Xu Min

China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing, 100840, China

Abstract: Using KASKAD program package, the author make a research about the Tianwan nuclear power plant loading TVS-2M fuel assembly from the first cycle, also design the TVS-2M fuel assembly and on this basis, study fuel management, obtaining three fuel management cases, including year fuel cycle case and two long fuel cycle cases. In each program, the important parameters of the reactor core are analyzed and all the safety parameters meet the design requirements. In long fuel cycle program, TVS-2M is using from the first cycle and after the transition of only two cycles, the length of cycle reached the requirement of long period. The increased average annual capacity factor of the plant and the decreased times of overhaul during the core's life which saving 30.8 percentage of the overhaul cost due to the long fuel cycle can largely improve the economic efficiency of the plant.

Key words: TVS-2M assembly, VVER, KASKAD, Long fuel cycle, Fuel management

作者简介:

王红霞(1978—),女,高级工程师。2003年毕业于西安交通大学,获工学硕士学位。现从事反应堆物理研究工作。

徐敏(1985—),男,工程师。2010年毕业于核工业第二研究设计院,获工学硕士学位。现从事反应堆数值计算和核物理专业的研究工作。

(责任编辑:杨洁蕾)