

文章编号: 0258-0926(2015)S1-0044-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.S1.0044

# CEPR 机组大修设计特点分析

王 军, 贾国安

台山核电合营有限公司生产计划处, 广东江门, 529228

摘要: 对第 3 代中国先进压水堆 (CEPR) 机组各种类型大修分布总体策略及 CEPR 机组各大修窗口主要操作所需工期进行分析, 发现 CEPR 机组大修短工期的实现主要得益于新设计特点及新工具、新材料的应用。同时也指出: 台山核电厂一期 CEPR 机组在短期内实现短大修可能面临的主要困难。

关键词: CEPR; 压水堆; 大修

中图分类号: TL38+7 文献标志码: A

## Analysis of Design Features for CEPR Unit Overhauling

Wang Jun, Jia Guo'an

Taishan Nuclear Power Plant, Jiangmen, Guangdong, 529228, China

Abstract: Analysis of the overall strategy for various overhauling of CEPR as well as the duration of the main activities in each overhauling window found that the new design features, and new tools and materials contributed to the short outage duration for CEPR unit overhauling. This paper points out the main difficulties faced by the short duration of overhauling for Taishan CEPR units.

Key words: CEPR, Pressurized water reactor, Overhauling

### 0 引言

核电厂大修一个最明显的特征是换料。同时, 在经过一定时间运行后要对一些功率运行时不能修的设备进行检修, 对设备进行一次较全面的“体检”以及利用大修进行一些功率运行时不能进行的试验, 确保设备安全可用。

大修工期是影响机组能力因子的一个关键因素, 在役的各个核电厂一直都在致力于大修管理改进、新技术、新工具运用, 以缩短大修工期, 提升电厂整体效益。对于新机组, 新设计、新工具、新材料的使用对大修工期的贡献是重点关注的。

### 1 CEPR 机组大修总体设计

大容量、多列安全冗余、高能力因子等特点是第 3 代中国先进压水堆 (CEPR) 机组区别于现役压水堆机组的主要特点。本文就 CEPR 机组大修设计特点作具体分析。

CEPR 机组设计的大修类型:

仅换料大修 (ROO), 工期 13 d; 正常换料大修 (NRO), 工期 16 d; 十年大修 (ISIO), 工期 40 d; 汽轮发电机全检大修 (TGO), 工期 30 d。

从机组商运起, 以 20a 为区间 (18 个月换料), 机组的能力因子计算公式及相关设计参数如下:

$$A = 100\% \times \left\{ \frac{1}{365} \left[ \frac{1}{20} (B + C + I_5) + I_7 \right] \right\}$$

$$B = 2 \times I_1 + K \times I_2 + K' \times I_3 + K'' \times I_4$$

$$C = (2 + K + K' + K'') \times I_6$$

式中,  $A$  为能力因子;  $B$  为大修损失天数 (20 a);  $C$  为机组升降功率损失天数 (20 a);  $I_1$  为 ISIO 设计工期 (40 d);  $I_2$  为 TGO 设计工期 (30 d);  $I_3$  为 NRO 设计工期 (16 d);  $I_4$  为 ROO 设计工期 (13 d);  $I_5$  为大修裕度 (每 20 a 中, 用于改造、大设备更换等, 按 150 d 算);  $I_6$  为升降功率损失天数 (每次大修 3 d);  $I_7$  为年度强迫大修

天数(每年 5 d);  $K$  为 TGO 次数(每 20 a);  $K'$  为 NRO 次数(每 20 a);  $K''$  为 ROO 次数(每 20 a)。

设计上提供了 3 种大修类型分布策略:

策略 1: 该策略要求在大修期间环路低水位状态执行的维修项目的检修周期需大于  $2C$ , 每 5 a 安排 1 次常规岛(CI)部分较全面的检修, 兼顾常规岛设备的维护需求。每 10 a 安排 1 次 ISIO, 机组的全寿期的设计能力因子可达 92.8%。具体分布见表 1。

策略 2: 该策略不安排 ROO, 对于维修大纲项目优化无特殊要求, 其他安排同策略 1, 此策略属于最保守的 1 种, 机组的全寿期的设计能力因子达 92.1%。具体分布见表 2。

策略 3: 该策略不安排 TGO, 其他安排同策略 1, 此策略对大修管理, 设备性能要求最高(特别是常规岛设备), 机组全寿期的设计能力因子可达 92.9%。具体分布见表 3。

从设计策略及大修设计工期来看, CEPR 机组的高能力因子是显而易见, 但都是基于短大修工期可实现的基础上。

## 2 大修具体分析

根据大修主要工作安排, 针对某一次具体大修的主要窗口, 主要分为停堆前、停堆、开启压力容器大盖、卸料、环路零水位工作(ROO 无环路零水位窗口)、装料、关闭压力容器大盖、启堆、升功率这 9 个窗口。

这些主要工作窗口, 与一般的压水反应堆(PWR)机组并无什么区别, CEPR 机组的短大

修工期主要体现在新技术、新工具、新材料的应用以及 CEPR 机组的设计特点。

### 2.1 新设计概念

2.1.1 在线小修 在机组功率运行状态下, 可安排核安全列设备的集中检修。对比世界上在役机组, 这是一个较大的优势, 在役的绝大部分机组核安全列设备的检修只能安排在大修中进行。主要得益于 CEPR 机组的多重冗余设计。4 列专设安全设施分别位于 4 个安全厂房内, 多冗余性保障了日常维护要求, 同时安全厂房的设计也保障了可达性和辐射防护的要求。

2.1.2 “两房”模式 CEPR 机组通过实体屏蔽及动态屏蔽, 将反应堆厂房(R 厂房)分隔成 2 个区域, “服务区”和“设备区”, “服务区”在功率运行期间即可进入; 这种设计便于核安全列设备的日常检修及功率运行模式下安全壳贯穿件试验的执行。“两房”模式对于大修更为显著的优势在于大修前的准备工作。机组解列前, 人员可提前进入 R 厂房内进行工具准备、场地布置等准备工作。

2.1.3 “19.5 m 平台扩展区” 区别于普通的 PWR 设计, CEPR 机组的设备舱门外不再是龙门架, 而是被燃料厂房完全包容, 在大修期间, 通过通风的动态屏蔽, 成为 19.5 m 平台的扩展区。当设备舱门满足开启条件后, 通过动态屏蔽, 将 R 厂房 19.5 m 检修平台面积扩大, 为 19.5 m 平台的工作开展提供更充裕的检修场地。

### 2.2 新设计、新材料及新工具

以 NRO 大修作为参考对各主要大修窗口的

表 1 大修类型分布策略 1

Table 1 Distribution Strategy 1 for Overhauling Types

大修轮次	商运	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
时间/a	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15	16.5	18	19.5
大修类型	—	NRO	ROO	TGO	ROO	NRO	ISIO	ROO	NRO	TGO	ROO	NRO	ROO	ISIO

表 2 大修类型分布策略 2

Table 2 Distribution Strategy 2 for Overhauling Types

大修轮次	商运	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
时间/a	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15	16.5	18	19.5
大修类型	—	NRO	NRO	TGO	NRO	NRO	ISIO	NRO	NRO	TGO	NRO	NRO	NRO	ISIO

表 3 大修类型分布策略 3

Table 3 Distribution Strategy 3 for Overhauling Types

大修轮次	商运	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
时间/a	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15	16.5	18	19.5
大修类型	—	NRO	ROO	NRO	ROO	NRO	ISIO	ROO	NRO	ROO	NRO	ROO	NRO	ISIO

设计工期及新设计、新材料及新工具的应用及贡献点做较详细阐述。

2.2.1 窗口 0：停堆前 R 厂房的分区设计，使得在大修前一周，人员可进入 R 厂房大部分区域，提前开展准备工作。

2.2.2 窗口 1：停堆 机组解列开始计算，此窗口的关键路径总工期约为 40.9 h。一回路新材料的使用，使得一回路降温速率明显提高，可达 50 /h。堆坑相关工作在此阶段是次关键路径，“19.5 m 平台扩展区”的设计使得工具运输、场地布置等工作更加游刃有余，对于 19.5 m 平台工作开展贡献明显。

此窗口中一回路排水至 3/4 环路及吹扫工作。对于 ROO 大修是否必须执行此操作，当前评估认为若一回路放化条件满足开盖要求，一回路排水至法兰面水位，无需吹扫即可实施开盖操作。同时由于蒸汽发生器 (SG) 的 U 型管未被排空，机组上行时，抽真空排气的工期也可节约出来，总计可节约大修工期近 20 h。

2.2.3 窗口 2：开启压力容器大盖 开大盖前堆坑的准备工作，在窗口 1 中实施。主要操作包含：“两房”模式结束，大盖强制冷却通风，大盖顶部工作开展条件准备，大盖顶部相关工作等。开盖窗口主要包含：开盖、堆池充水、上部内部构件吊出等，仅执行为换料目的的必需操作，总工期约为 40 h。

2.2.4 窗口 3：卸料 该窗口设计总工期约为 42 h，虽然 CEPR 机组燃料组件数量有 244 组 (CPR 机组为 157 组)，但卸料总工期和 CPR 机组差不多，得益于新型换料机速度的提升。

2.2.5 窗口 4：环路零水位工作 该窗口设计关键路径工期约为 81 h。主要包含一回路排水，SG 一次侧相关工作，环路零水位设备检修，一回路充水等。真正环路零水位检修工作窗口工期约为 63 h。这期间 K 厂房会进行燃料的倒料操作，在 NRO 大修中，倒料操作不是关键路径；而在 ROO 大修中 (无环路零水位检修窗口)，倒料操作是关键路径。

2.2.6 窗口 5：装料 装料窗口比卸料窗口的设计工期长约 3 h，用于装料后的堆芯照相工作。关键路径总工期约 41 h。

2.2.7 窗口 6：关闭压力容器大盖 该窗口设计

总工期约为 60 h。主要作业活动和现役 PWR 机组区别不大，新专用工具 (如：压力容器螺孔检查、清洁、润滑一体机等) 的使用，对关键路径项目有一定贡献。

2.2.8 窗口 7：启堆 CEPR 机组设计上考虑了抽真空排气，这点较现役大部分机组，在大修后机组启动阶段，工期有一定的缩短。此窗口设计总工期约为 81 h。

2.2.9 窗口 8：升功率 达到 25% 满功率 (FP) 后，机组并网，继续升功率至满功率，此窗口工期不计入大修工期。

经过对各大修窗口主要工作的分析，可得出 CEPR 机组正常换料大修总工期约 385 h，即 16 d。对于 ROO，无环路零水位检修窗口，只有燃料厂房 (K 厂房) 倒料所需的 15 h 左右，则可得出 ROO 总工期在 320 h 以内，约 13 d。对于 ISIO，主要以“一回路水压试验”、“压力容器在役检查”、“安全壳整体打压试验”为标志，与一般的 PWR 区别不大，但设计工期为 40 d。

### 3 结束语

经过对 CEPR 机组各窗口关键路径工期的较详细分析，可得出：对于一次正常大修，除环路零水位检修窗口的项目是纯检修目的及个别定期试验占用关键路径外，其他窗口的各项操作都是 PWR 机组一个换料周期为了换料所必须执行的操作。同时很多窗口的总工期较现役机组有了明显改进，主要得益于新设计、新技术及新专用工具的使用。

CEPR 机组核岛设计优势明显，但台山核电厂 CEPR 机组大修仍需考虑常规岛检修短工期实现的可行性。按照欧洲大多数核电厂的维修策略 (厂家直供方式)，目前评估结果认为能够基本满足设计上的短工期要求。按中国核电检修队伍现状，在首台 CEPR 机组商运后的一段时间内，常规岛的检修很可能成为大修关键路径。但也无需过分担心随着我国核电厂的运维管理水平的不断提高，常规岛检修成为大修关键路径即使出现，也是暂时的。且有理由相信随着科技进步，技术更新，人员素质及技能水平的提升，CEPR 机组的短大修工期不但可以实现，而且仍有突破空间。

(责任编辑：杨洁蕾)