



VVER-1000

核电站综合性能试验



王建瑜 黄潜 主编
屈凡玉 副主编

中国核工业集团公司 编

中国原子能出版社

VVER-1000 核电站综合性能试验

主 编 黄 潜

副主编 王建瑜 屈凡玉

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

VVER-1000 核电站综合性能试验/黄潜主编.

—北京:中国原子能出版社,2013.11

ISBN 978-7-5022-5986-0

I. ①V… II. ①黄… III. ①压水型堆—核电站—机组—性能试验 IV. ①TM623.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 177502 号

内 容 简 介

《VVER-1000 核电站综合性能试验》主要介绍了 VVER-1000 压水堆核电机组综合性能试验的理论和经验,内容包括:安全壳密封和强度试验、田湾核电站放射性通风空气净化系统过滤器效率试验、非能动式氢复合装置对催化板的定期试验、热交换器效率试验、田湾核电站控制棒驱动机构台架试验、田湾核电站一回路热位移试验、机组性能分析、瞬态次数统计、氦气检漏等。

本系列教材可作为从事 VVER-1000 压水堆核电机组综合性能试验的人员的培训教材,也可供从事压水堆核电站工作的相关技术人员和承包商参考阅读。

VVER-1000 核电站综合性能试验

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 卫广刚

装帧设计 赵 杰

责任校对 冯莲凤

技术编辑 丁怀兰

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 22.25

字 数 555 千字

版 次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5986-0

定 价 105.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

中国核工业集团公司 核电培训教材编审委员会

总 编 孙 勤
副 总 编 俞培根 叶奇蓁

编辑委员会

主 任	陈 桦					
副 主 任	程慧平	孙习康	何小剑			
委 员	李建峰	张振华	张建成	吴炳泉	戚屯锋	
	邹正宇	黄 潜	商幼明	缪亚民	卢铁忠	
	葛政法	周建虎	张 勇	李苏甲	杨树录	
	邵焕会	于鉴夫				

执行编委

王 刚	郭善兴	莫银良	叶丹萌	王晓波
杨 克	屈凡玉	蔡黎勇	唐锡文	谢先林
李 雁	王海平	祁昌明	丁怀兰	肖 武
张国华				

编委会办公室

霍颖颖	张红军	李兴雷	齐红心	章 超
刘 朔	侯茸方	黄 芳	方朝霞	李 丹
沈 阳				

《VVER-1000 核电站综合性能试验》

编 辑 部

主 编 黄 潜

副 主 编 王建瑜 屈凡玉

编 者 付小军 管玉峰 魏建军 朱金雄 欧阳钦

统审专家 李保廷 陈建新

总 序

核工业作为国家高科技战略性产业,是国家安全的重要基石、重要的清洁能源供应,以及综合国力和大国地位的重要标志。

1978年以来,我国核工业第二次创业。中国核工业集团公司走出了一条以我为主发展民族核电的成功道路。在长期的核电设计、建造、运行和管理过程中,积累了丰富的实践和理论经验,在与国际同行合作过程中,实现了技术和管理与国际先进水平相接轨,取得了骄人的业绩。

中国核工业集团公司在三十多年的核电建设中,经历了起步、小批量建设、快速发展三个阶段。我国先后建成了秦山、大亚湾、田湾三大核电基地,实现了我国大陆核电“零”的突破、国产化的重大跨越、核电管理与国际接轨,走出了一条以我为主,发展民族核电的成功之路。在最近几年中,发展尤为迅猛。截至2008年底,核电运行机组11台,装机容量907.82万千瓦,全部稳定运行,态势良好。

进入新世纪,党中央、国务院和中央军委对核工业发展高度重视、极为关怀,对核工业做出了新的战略决策。胡锦涛总书记指出:“无论从促进经济社会发展看,还是从保障国家安全看,我们都必须切实把我国核事业发展好”。发展核电是优化能源结构、保障能源安全、满足经济社会发展需求的重要途径。2007年10月,国务院正式颁布了《核电中长期发展规划(2005—2020年)》。核电进入了快速、规模化、跨越式发展的新阶段。

在中国核电大发展之际,中国核工业集团公司继续以“核安全是核工业的生命线”的核安全文化理念和“透明、坦诚和开放”的企业管理心态,以推动核电又好又快又安全发展为己任,为加速培养核电发展所需的各类人才,组织核电领域专家,全面系统地对核电设计、工程建造、电站调试、生产准备和生产运营等各阶段的知识进行了梳理,构造了有逻辑性、系统性的核电知识体系,形成了覆盖核电各阶段的核电工程培训系列教材。

这套教材作为培养核电人才的重要工具,是国内目前第一套专业化、体系化、公开出版的核电人才培养系列教材,有助于开展培训工作,提高培训质量、节约培训成本,夯实核电发展基础。它集中了全集团的优势,突出高起点、实用性强,是集团化、专业化运作的又一次实践,是中国核工业 50 余年知识管理的积淀,是中国核工业 10 万人多年总结和实践经验的结晶。

21 世纪是“以人为本”的知识经济时代,拥有足够的优秀人才是企业持续发展的重要基础。中国核工业集团公司愿以这套教材为核电发展开路,为业界理论探讨、实践交流提供参考。

我们要继续以科学发展观为指导,认真贯彻落实党中央、国务院的指示精神,积极推进核电产业发展。特别是要把总结核电建设经验作为一项长期的工作来抓,不断更新和完善人才教育培训体系。

核电培训系列教材可广泛用于核电厂人员培训,也可用于核电管理者的学习工具书,对于有针对性地解决核电厂生产实践和管理问题具有重要的参考价值。

中国核工业集团公司总经理



2009 年 9 月 9 日

前 言

随着中国核电的快速发展,核电人才的需求也日益增长。为了配合中国核工业集团公司(简称中核集团公司)系统化、正规化的全员培训工作,提高培训质量,提高员工的核安全文化意识,为中核集团公司的发展夯实基础,江苏核电有限公司培训中心按照中核集团公司核电培训教材编审委员会的要求,组织公司有丰富理论知识和实践经验的专业技术人员共同编写了《VVER-1000 核电站综合性能试验》培训教材。

本系列教材共一册,参考了 VVER-1000 核电站机械与电气教材的构架,本着理论联系生产实际的原则,以核电厂有效法规标准、调试程序及系统设计文件等为依据,采用图文并茂的形式讲解 VVER-1000 核电站综合性能试验的理论知识、过程和经验,文字通俗易懂,是一套适用性、针对性较强的技术培训教材,适合于核电站性能试验人员理论培训,也可作为压水堆核电站其他工程技术人员及承包商的参考资料。

参与《VVER-1000 核电站综合性能试验》编审的人员有:

第一章,安全壳密封和强度试验,由朱金雄、付小军、管玉峰、魏建军、欧阳钦编写,王建瑜、支凤春审核;

第二章,田湾核电站放射性通风空气净化系统过滤器效率试验,由魏建军、管玉峰编写,欧阳钦、支凤春审核;

第三章,JMT 系统非能动式氢气复合装置对催化板的定期试验,由付小军、管玉峰编写,欧阳钦、支凤春审核;

第四章,热交换器效率试验,由付小军、管玉峰编写,欧阳钦、支凤春审核;

第五章,田湾核电站控制棒驱动机构台架试验,由魏建军、管玉峰、欧阳钦编写,王建瑜、支凤春审核;

第六章,田湾核电站一回路热位移试验,由魏建军、管玉峰编写,欧阳钦、支

凤春审核；

第七章，机组性能分析，由付小军、管玉峰编写，欧阳钦、支凤春审核；

第八章，瞬态次数统计，由魏建军、管玉峰编写，欧阳钦、支凤春审核；

第九章，氦气检漏，由付小军、管玉峰编写，欧阳钦、支凤春审核。

本教材的内容由核动力运行研究所统审。

在本教材的编写过程中得到了江苏核电有限公司总经理部、技术支持处、培训中心等部门的大力支持，在此谨一并表示诚挚的谢意。

本教材疏漏或不妥之处在所难免，敬请读者批评和指正。

江苏核电有限公司

2012 年 8 月

目 录

第一章 安全壳密封和强度试验

1.1 安全壳整体密封性试验和安全壳结构强度试验	1
1.1.1 田湾核电站一期工程安全壳监测系统	1
1.1.2 安全壳整体试验常用标准介绍	4
1.1.3 田湾核电站安全壳整体性试验方案	12
1.1.4 安全壳密封监测系统 JMA10	23
1.1.5 安全壳整体试验组织与准备	53
1.1.6 安全壳整体试验现场实施	71
1.1.7 历次安全壳整体密封试验情况	78
1.1.8 外安全壳密封试验	92
1.1.9 安全壳结构强度设计	93
1.1.10 安全壳结构强度试验	104
1.1.11 安全壳整体试验经验反馈	106
1.2 安全壳闸门密封试验	117
1.2.1 人员闸门、设备闸门的功能	117
1.2.2 人员闸门、设备闸门组成、主要部件结构、技术参数 及工艺限制	117
1.2.3 设备闸门的组成、主要部件结构及技术参数	123
1.2.4 安全壳密封试验相关标准对闸门密封试验要求	125
1.2.5 田湾核电站闸门密封试验	126
1.3 安全壳成组贯穿件/备用贯穿件/地坑隔离阀 套筒密封性试验	130
1.3.1 概述	130
1.3.2 安全壳成组贯穿件密封性试验	131
1.3.3 安全壳备用贯穿件密封性试验	133
1.3.4 安全壳地坑隔离阀套筒密封性试验	135

1.4 安全壳电气贯穿件	137
1.4.1 电气贯穿件的内容功能、范围、分类及额定值	137
1.4.2 电气贯穿件设计要求	139
1.4.3 田湾核电站现场安装的电气贯穿件结构	141
1.4.4 电气贯穿件密封试验要求	144
1.5 安全壳机械贯穿件隔离阀密封性试验	145
1.5.1 概述	145
1.5.2 田湾核电站安全壳机械贯穿件隔离类型	145
1.5.3 安全壳机械贯穿件密封性试验	147
1.5.4 安全壳机械贯穿件试验经验反馈	156
1.6 安全壳结构定期监测系统	158
1.6.1 安全壳结构监测系统简介	158
1.6.2 安全壳结构强度测试方法及原理	159
1.6.3 安全壳结构强度测试经验反馈	169
复习思考题	172

第二章 田湾核电站放射性通风空气净化系统过滤器效率试验

2.1 田湾核电站放射性通风空气净化系统高效过滤器效率试验	173
2.1.1 概述	173
2.1.2 放射性通风空气净化系统高效过滤器简介	173
2.1.3 试验方法及原理	174
2.1.4 试验设备及仪器	176
2.1.5 试验操作过程	178
2.1.6 经验反馈	181
2.2 田湾核电站放射性通风空气净化系统碘吸附器效率试验	183
2.2.1 概述	183
2.2.2 放射性通风空气净化系统碘吸附器简介	184
2.2.3 试验方法及原理	186
2.2.4 试验设备及仪器	186
2.2.5 试验操作过程	189
2.2.6 经验反馈	192
复习思考题	194

第三章 JMT 系统非能动式氢气复合装置对催化板的定期试验

3.1 核电站安全壳内氢气浓度的控制	195
3.1.1 概述	195
3.1.2 核电站安全壳内氢气产生方式	195
3.1.3 核电站安全壳内氢气浓度控制原则和措施	196
3.2 田湾核电站 JMT 系统非能动式氢气复合装置	197
3.2.1 概述	197
3.2.2 田湾核电站非能动式氢气复合装置类型	197
3.2.3 田湾核电站非能动式氢气复合装置结构与安装	197
3.2.4 田湾核电站非能动式氢气复合装置消氢原理	200
3.2.5 田湾核电站非能动式氢气复合装置效率试验	201
3.2.6 田湾核电站非能动式氢气复合装置再生试验	203
复习思考题	204

第四章 热交换器效率试验

4.1 热交换器的基本知识	205
4.1.1 概述	205
4.1.2 传热的一般概念	205
4.1.3 传热过程	206
4.1.4 污垢系数	207
4.1.5 换热器分类	207
4.2 田湾核电站热交换器效率实验	210
4.2.1 概述	210
4.2.2 田湾核电站换热器效率试验周期	216
4.2.3 田湾核电站换热器效率试验验收准则	216
4.2.4 田湾核电站换热器效率试验	217
4.2.5 田湾核电站换热器效率数据处理方法	227
4.2.6 换热器效率试验性能分析其他方法	227
复习思考题	242

第五章 田湾核电站控制棒 驱动机构台架试验

5.1 田湾核电站控制棒驱动机构及台架	243
5.1.1 概述	243
5.1.2 控制棒驱动机构功能	243
5.1.3 控制棒驱动机构结构	243
5.1.4 控制棒驱动机构工作原理	245
5.1.5 控制棒驱动机构试验台架结构	248
5.2 操作台及台架试验过程	249
5.2.1 操作台(PSS)	249
5.2.2 控制棒驱动机构台架试验操作过程	255
复习思考题	256

第六章 田湾核电站 一回路热位移试验

6.1 概述	257
6.2 液压阻尼器简介	257
6.3 热位移试验	263
6.3.1 概述	263
6.3.2 先决条件	263
6.3.3 工业安全和辐射防护要求	265
6.3.4 试验操作过程	265
6.3.5 试验数据分析	265
6.4 监测系统操作方法	268
6.4.1 通讯配置方法	268
6.4.2 运行软件操作方法	271
复习思考题	278

第七章 机组性能分析

7.1 机组热力系统及其分析方法	279
7.1.1 概述	279

7.1.2	电厂热力系统分类	279
7.1.3	回热系统及其设备	280
7.2	田湾核电站机组性能分析	287
7.2.1	概述	287
7.2.2	田湾核电站汽轮机主要技术规范	287
7.2.3	试验周期	288
7.2.4	机组和设备状态	288
7.2.5	运行工况检查	288
7.2.6	参数选取要求	289
7.2.7	在线数据采集	289
7.2.8	性能数据分析处理方法	297
7.2.9	性能分析经验反馈	299
	复习思考题	300

第八章 瞬态次数统计

8.1	田湾核电站设计瞬态	301
8.1.1	概述	301
8.1.2	瞬变产生的原因	301
8.1.3	瞬态统计目的	301
8.1.4	设计瞬态及重要瞬变限值	302
8.2	田湾核电站瞬态次数统计	328
8.2.1	概述	328
8.2.2	数据收集	328
8.2.3	瞬变判断	328
8.2.4	文件与归档	328
8.2.5	经验反馈	329
	复习思考题	329

第九章 氦气检漏

9.1	氦质谱检漏仪	330
9.1.1	概述	330
9.1.2	氦质谱检漏仪的工作原理	330
9.1.3	氦质谱检漏仪的技术参数与组成	330

9.1.4	仪器设备安装启动	334
9.1.5	检漏方法	335
9.1.6	设备的停运和维护	335
9.1.7	QT100 的使用	336
9.2	田湾核电站氦气检漏实例	337
9.2.1	田湾核电站 1 号机组凝汽器水室管板及钛管氦气 检漏	337
9.2.2	田湾核电站 1 号机组 KUL 系统氦气检漏	340
9.2.3	田湾核电站 2 号机组 2 号蒸汽发生器冷集流管一次 侧泄漏监测管二次侧部分引压管线氦气检漏	341
	复习思考题	342

第一章 安全壳密封和强度试验

1.1 安全壳整体密封性试验和安全壳结构强度试验

1.1.1 田湾核电站一期工程安全壳监测系统

1.1.1.1 安全壳总体结构功能

田湾核电站安全壳设计为双层安全壳结构,其中内安全壳为主要密封边界,外安全壳作为辅助密封边界。内安全壳直径(内径)44 m,安全壳筒体部分混凝土厚度为 1.2 m,穹顶区域的混凝土厚度为 1 m,穹顶为一个标准的半球形。内安全壳设计了 2 个扶壁柱,分别布置在 120°方位角和 300°方位角,直达穹顶对接;扶壁柱混凝土宽为 3 m、厚度为 1 m,扶壁柱主要用于水平预应力钢缆的锚固。外安全壳为非预紧钢筋混凝土结构,混凝土厚度为 0.6 m,内外安全壳之间距离 1.8 m。

内安全壳设计压力 0.39 MPa(表压),在发生设计基准(LOCA)事故状态下,安全壳承受压力 0.39 MPa(表压)、温度最高可达 150 °C 的蒸汽空气混合物,24 h 内的气体泄漏率不超过安全壳自由容积的 0.2%。基于上述设计要求,在安全壳内壁上安装了厚度为 6 mm 的碳钢内衬,作为密封屏障。内安全壳的总容积约为 8.4 万 m³,自由容积大约为 6.92 万 m³。正常运行时,通过反应堆厂房的排风系统,将安全壳内的压力保持负压 150~400 Pa,从而降低安全壳内放射性气体外漏的可能性。

外安全壳作为辅助密封边界,与内安全壳的外壁共同形成一个环形空间。环形空间的主要作用为:在事故情况下包容从内安全壳泄漏出来的放射性物质。外安全壳还有几个作用:1)物理保护,防止外力(飞机坠落、飓风等)直接作用在内安全壳上;2)降低内安全壳混凝土的温度波动;3)保护内安全壳的电气贯穿件。内安全壳与外安全壳之间的环形空间容积大约为 2.5 万 m³。机组正常运行工况下,通过核岛主排风系统,将环形空间的压力保持负压 100~400 Pa,从而降低放射性气体外漏的可能性。

1.1.1.2 安全壳贯穿件

在安全壳筒体部分安装了各种贯穿件,用于实现各种运输、工艺、控制功能。其中人员闸门预埋法兰 2 个,直径 2.7 m;设备闸门预埋法兰 1 个,直径 7.4 m;各类贯穿件总计 284 个,通风系统贯穿件 4 个,其中工艺贯穿件 71 个,备用工艺贯穿件 26 个,仪表管(成组)贯穿件 27 个,电缆贯穿件 156 个。上述 3 个预埋法兰与 284 个贯穿件都是安全壳的密封边界,都必须进行气密性的检查。

两个人员闸门分别位于标高 10.7 m 和标高 34.0 m,其中 34 m 人员闸门作为运行期

间的主要人员通道,10.7 m 人员闸门作为应急人员通道。人员闸门为筒体结构,在密封区与非密封区各安装一扇门,两扇门不能同时打开,确保气密性边界的完整。在标高 34.0 m 与人员闸门相对位置安装设备闸门,设备闸门主体为圆筒结构,设置内外两道密封门和一个应急人孔。闸门的密封主要通过安装在门(人孔)上的双层橡胶密封圈来实现。闸门的密封性检查是安全壳试验的重要内容。

在安全壳上设置了 4 个通风系统贯穿件,其中 2 个贯穿件(KLD10 反应堆厂房安全壳负压保持抽气,反应堆厂房空气溢流系统)直径为 250 mm,2 个贯穿件(KLD20 反应堆厂房维修应急通风进气和抽气系统)直径 1 000 mm。通风系统贯穿件的两侧都安装了快速关闭隔离阀,该阀门的密封为机械密封。在安全壳内侧的隔离阀前设置了可拆卸的过渡管段,在对通风系统隔离阀进行密封性试验前需要将过渡管段拆除,安装带试验接口的法兰。

已经使用的安全壳工艺系统贯穿件为 71 个,分别对应安全壳内的各工艺系统。除安注系统、主蒸汽系统外,绝大多数工艺系统贯穿件的两侧都设置了快速关闭隔离阀。根据俄罗斯法规 OTT—88 的要求,对需要进行隔离阀密封性试验的系统都设置了专门的试验管线,便于进行隔离阀气密性检查。工艺系统贯穿件分布在靠近 UKA 核辅助厂房、UKD 安全厂房、UJE 蒸汽管道厂房的方位。

安全壳备用工艺贯穿件 26 个,在安全壳内侧,使用与贯穿件相同材质的堵板,对备用工艺贯穿件进行了封堵。工艺贯穿件的气密性检查主要靠目视检查和焊缝的渗透检查。

安全壳电缆贯穿件 156 个,分成三类。其中包括高压(6.3 kV)电缆贯穿件、低压(0.4 kV)电缆贯穿件和控制信号电缆贯穿件。电缆贯穿件的腔体内充满 250 kPa 的氮气来实现密封,防止安全壳内的放射性气体通过电缆贯穿件泄漏出来。电缆贯穿件的气密性检查主要通过安装在贯穿件本体上的一个压力表来实现,通过压力表的读数变化来反映密封性能。

1.1.1.3 安全壳结构强度监测系统

安全壳强度监测系统的设计是俄方设计院委托法国 Fressinet 公司设计的,主要包括安全壳混凝土应变及温度测量系统、安全壳预应力钢束监测系统以及安全壳位移测量系统。

安全壳混凝土应变和温度测量系统(JMB10)包括 5 个电气开关柜、234 个 C110 振弦应变传感器、168 个 Pt-100 铂电阻温度计。C110 振弦应变传感器预埋安装在混凝土的内侧和外侧,3 个一组,分别测量 X/Y/Z 方向上的混凝土局部应变情况;Pt-100 铂电阻温度计预埋安装在混凝土的径向方向,测量混凝土的径向温度变化,其中最内侧的一个和最外侧的一个铂电阻温度靠近振弦应变传感器,其测量结果用于修正振弦传感器的测量结果。上述传感器都已经预埋在混凝土内,无法更换和在线校准。该系统的传感器布置在安全壳 5 个角度的不同标高位置,分别为布置在安全壳的 26°方位角(C110 传感器 48 个,Pt-100 温度计 32 个)、120°方位角(C110 传感器 54 个,Pt-100 温度计 36 个)、196°方位角(C110 传感器 48 个,Pt-100 温度计 32 个)、300°方位角(C110 传感器 48 个,Pt-100 温度计 32 个)、250°方位角(C110 传感器 36 个,Pt-100 温度计 24 个)。其中 250°方位角的传感器用于监测设备闸门周围的混凝土应变情况,不参与安全壳整体强度数据的评估。

安全壳预应力钢缆监测系统(JMB20)包括 8 个载荷传感器和 2 个测量电气开关柜,分别安装在水平预应力钢缆 H12A、H12B、H19A、H19B 的锚固端和垂直预应力钢缆 V12A、V12B、V14A、V14B 的锚固端。