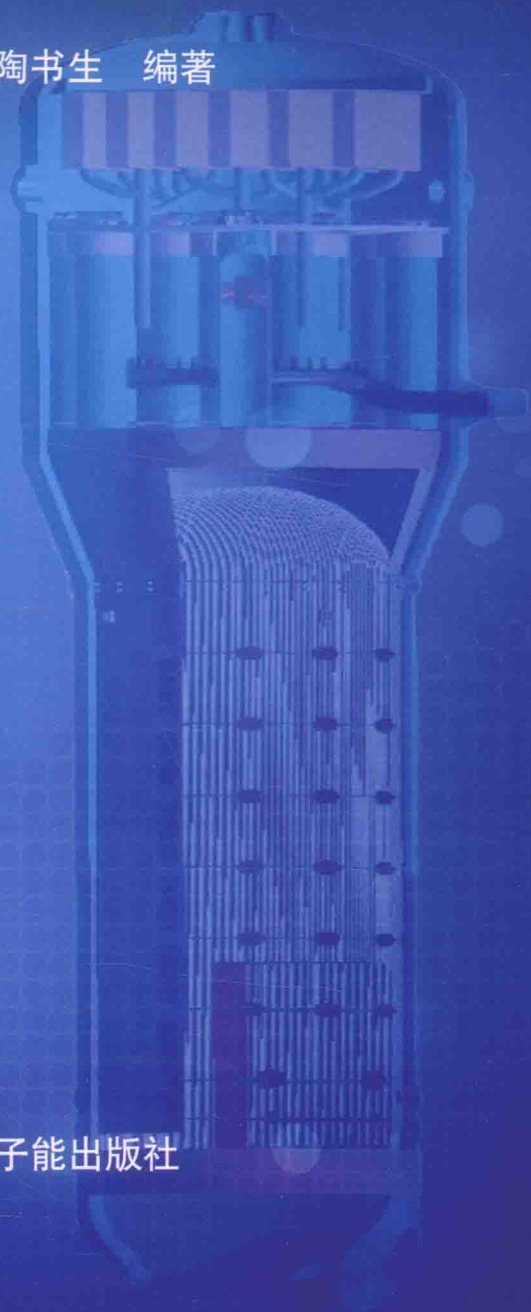


核电厂蒸汽发生器完整性

周 红 陶书生 编著



中国原子能出版社

核电厂蒸汽发生器完整性

周 红 陶书生 编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核电厂蒸汽发生器完整性 / 周红, 陶书生编著. —北京: 中国原子能出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-5022-6634-9

I. ①核… II. ①周… ②陶… III. ①核电厂-蒸汽发生器-安全技术 IV. ①TM623.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 103481 号

内 容 简 介

《核电厂蒸汽发生器完整性》的主要内容包括: 核电厂蒸汽发生器的设计、蒸汽发生器的降质机理、传热管涡流检测技术、典型蒸汽发生器传热管破裂事件、蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)的事故分析、SGTR事故的风险重要度分析以及蒸汽发生器传热管的监督要求和各国的在役检查准则。

本书可以为核能与核技术专业人员的学习和培训提供参考, 可为核电厂运行、管理、技术支持、设计、监管部门和无损检验单位的工程技术人员提供有效指导, 也可作为蒸汽发生器的设计和研发人员提供参考与借鉴, 亦可为蒸汽发生器的安全运行提供了重要的技术支持。

核电厂蒸汽发生器完整性

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 孙凤春
责任校对 冯莲凤
责任印刷 潘玉玲
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 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 15 字 数 371 千字
版 次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-6634-9 定 价 98.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

蒸汽发生器作为核电厂核心设备之一,其完整性对核电厂的安全可靠运行至关重要。从我国第一座核电厂 1991 年投运,截至 2014 年年底,已投运核电机组 23 台,在建机组 27 台,蒸汽发生器的完整性愈来愈受到关注。蒸汽发生器的设计改进是完善核电厂安全运行技术的重要一环。

以压水堆为例,蒸汽发生器传热管作为一、二回路介质的交界面,是一回路压力边界的重要组成部分,构成了超过 50% 的一回路压力边界。典型蒸汽发生器是壳管式热交换器,有成千上万根传热管,每个蒸汽发生器的传热管表面积约为 $2\,500\sim 12\,000\text{ m}^2$ 。蒸汽发生器传热管破损(SGTR)会造成放射性物质旁通安全壳,导致放射性物质泄漏。若发生 SGTR 事故,会导致操纵员不容易控制的复杂核电厂瞬态,对核电厂安全构成威胁。

为了实现有效的屏障,传热管必须预防裂缝、穿孔和一般的降级。然而,蒸汽发生器传热管的大面积降级已在一些核电厂发生。在给定年度内,世界上约有一半的压水堆核电厂将保养或维修蒸汽发生器传热管,堵管的比例占 $0.3\%\sim 0.34\%$ 。美国早期单个核电厂审查项目共审查了 20 个压水堆,结果表明压水堆蒸汽发生器传热管破损的风险在 10% 之上,其他堆型的传热管破损风险更高。压水堆核电厂设备故障概率统计也表明蒸汽发生器故障居于首位,故障部位主要涉及筒体、给水管嘴和传热管,其中传热管故障居首位。大量的运行实践表明,通过适当和及时的检查、堵管或在过量传热管破损后进行套管,蒸汽发生器传热管失效的频率和后果能大大地减少。

《核电厂蒸汽发生器完整性》全面介绍了几种典型的蒸汽发生器的设计,讨论了不同蒸汽发生器降级机理相关的压力源、易受损部位和失效模式以及各国的经验反馈,详细说明了蒸汽发生器传热管涡流检测技术,统计了目前所发生的各种传热管损坏事件,并给出了几种典型压水堆核电厂 SGTR 事故分析和风险评价,从破裂原因、核电厂瞬态、操纵员行动、环境影响和补救措施等方面对已发生的传热管破裂事件进行了总结,最后一章介绍了世界各国蒸汽发生器传热管的监督要求和在役检查准则。

全书共分八章。第一章由侯秦脉编写;第二章由杨海峰、吴彦农编写;第三章由张加军、吴彦农、常猛编写;第四章由李华升、胡江、马国强编写;第五章由杨未东、许友龙、刘时贤编写;第六章由褚倩倩、侯秦脉编写;第七章由张增庆、侯秦脉编写;第八章由张庆华、王娅琦、于开治编写。整书由周红、陶书生、俞尔俊进行了统稿,由郑丽馨、焦峰、马国强、廉旭姣进行了校核。

《核电厂蒸汽发生器完整性》在编写过程中得到了国家核安全局、环境保护部核与辐射安全中心、中核武汉核动力运行研究所、江苏核电有限公司、中国核电工程有限公司、中核核电运行管理有限公司等相关单位的大力支持。此外柴国旱、杨堤、孙造占、周汇东、王伟、徐长江、但体纯、刘维平等各位专家为本书提供了非常好的建议,编者在此表示诚挚的谢意。

本书可为核能与核技术专业人员的学习和培训提供参考,可为核电厂运行、管理、技术支持、设计、监管部门和无损检验单位的工程技术人员提供有效指导,也可为蒸汽发生器的设计和研发人员提供参考与借鉴,还可为核电厂运行、维修和技术支持的专业人员提供培训教材,以及为高等院校相关专业师生提供参考。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

编著者

2014 年 11 月

目 录

第一章 引言	1
第二章 蒸汽发生器介绍	3
2.1 蒸汽发生器的设计功能	3
2.2 蒸汽发生器设计所依据的规范和标准	3
2.3 典型核电厂蒸汽发生器的设计	4
2.3.1 美国压水堆自然循环蒸汽发生器	4
2.3.2 CPR1000 型压水堆的蒸汽发生器	6
2.3.3 俄罗斯 VVER 型压水堆的蒸汽发生器	12
2.3.4 AP1000 型压水堆的蒸汽发生器	15
2.3.5 EPR 型压水堆的蒸汽发生器	18
2.3.6 加拿大重水反应堆自然循环蒸汽发生器	22
2.3.7 其他类型压水堆的直流式蒸汽发生器	23
2.4 蒸汽发生器重要部件	24
2.4.1 传热管	24
2.4.2 蒸汽发生器外壳和给水管嘴	29
第三章 蒸汽发生器降质机理和失效模式	32
3.1 压水堆和 CANDU 堆传热管降质概述	32
3.2 压水堆和 CANDU 堆蒸汽发生器传热管降质机理和失效模式	34
3.2.1 一回路应力腐蚀开裂	38
3.2.2 二回路应力腐蚀开裂	40
3.2.3 微振磨蚀、磨损和减薄	42
3.2.4 点蚀	44
3.2.5 凹痕	45
3.2.6 高周疲劳	46
3.2.7 耗蚀	47
3.3 压水堆直流蒸汽发生器传热管失效模式	47
3.3.1 侵蚀腐蚀	48
3.3.2 高周疲劳	48
3.3.3 低温一次侧应力腐蚀裂纹	49
3.3.4 二次侧晶间应力腐蚀和晶间腐蚀	49
3.4 压水堆和 CANDU 堆蒸汽发生器筒体和给水管嘴降质	49
3.4.1 蒸汽发生器筒体降质	50
3.4.2 给水管嘴降质	51

3.4.3	热套管,J型管,给水环管和分隔板的冲刷腐蚀降质	51
3.5	VVER-1000 蒸汽发生器降质	52
3.5.1	传热管降质	52
3.5.2	集流管的应力腐蚀开裂	52
3.5.3	给水分配系统的冲刷腐蚀	54
3.5.4	集流管盖板螺栓故障	54
3.6	蒸汽发生器在役传热管寿命评估	55
3.6.1	统计分析方法	56
3.6.2	适用统计分析模式的筛选	62
3.7	传热管完整性性能准则及其评估	62
3.7.1	传热管完整性性能准则	62
3.7.2	状态监督评估	63
3.7.3	运行评估	63
3.8	小结	64
第四章	蒸汽发生器传热管涡流检测技术	65
4.1	传统的涡流检测技术	66
4.1.1	涡流检测的原理	66
4.1.2	基本探头	67
4.1.3	多频/多参数涡流法	70
4.2	先进的涡流检测技术	71
4.2.1	旋转扁平线圈	72
4.2.2	阵列探头	73
4.2.3	发射/接收探头	73
4.2.4	衬管检查	74
4.2.5	机械堵管的检查	75
4.3	涡流检测技术的应用	76
4.3.1	一回路应力腐蚀	78
4.3.2	晶间腐蚀	79
4.3.3	二回路应力腐蚀	79
4.3.4	点蚀	80
4.3.5	耗蚀	80
4.3.6	凹痕	80
4.3.7	高周疲劳	80
4.3.8	微振磨损和机械磨损	81
4.4	涡流检测技术在国内蒸汽发生器的应用	82
第五章	典型蒸汽发生器传热管破裂事件	85
5.1	波因特滩核电厂1号机组	85
5.1.1	传热管破裂原因	85
5.1.2	反应堆瞬态	86

5.1.3	操纵员行动	86
5.1.4	环境影响	86
5.1.5	补救措施	86
5.2	萨里核电厂 2 号机组	87
5.2.1	传热管破裂原因	87
5.2.2	反应堆瞬态	87
5.2.3	操纵员行动	88
5.2.4	环境影响	88
5.2.5	补救措施	88
5.3	多伊尔核电厂 2 号机组	89
5.3.1	传热管破裂原因	89
5.3.2	反应堆瞬态	89
5.3.3	操纵员行动	89
5.3.4	环境影响	89
5.3.5	补救措施	89
5.4	普雷里岛核电厂 1 号机组	90
5.4.1	传热管破裂原因	90
5.4.2	反应堆瞬态	90
5.4.3	操纵员行动	90
5.4.4	环境影响	91
5.4.5	补救措施	91
5.5	京纳核电厂 1 号机组	91
5.5.1	传热管破裂原因	91
5.5.2	反应堆瞬态	92
5.5.3	操纵员行动	94
5.5.4	环境影响	94
5.5.5	补救措施	95
5.6	卡尔洪堡核电厂	95
5.6.1	传热管破裂原因	95
5.6.2	反应堆瞬态	96
5.6.3	操纵员行动	96
5.6.4	环境影响	96
5.6.5	补救措施	96
5.7	北安娜核电厂 1 号机组	96
5.7.1	传热管破裂原因	97
5.7.2	反应堆瞬态	97
5.7.3	操纵员行动	99
5.7.4	环境影响	99
5.7.5	补救措施	99

5.8 麦克圭尔核电厂 1 号机组	99
5.8.1 传热管破裂原因	100
5.8.2 反应堆瞬态	100
5.8.3 操纵员行动	101
5.8.4 环境影响	102
5.8.5 补救措施	102
5.9 美滨核电厂 2 号机组	102
5.9.1 传热管破裂原因	102
5.9.2 反应堆瞬态	102
5.9.3 操纵员行动	103
5.9.4 环境影响	103
5.9.5 补救措施	103
5.10 帕洛弗迪核电厂 2 号机组	103
5.10.1 传热管破裂原因	104
5.10.2 反应堆瞬态	106
5.10.3 操纵员行动	106
5.10.4 环境影响	107
5.10.5 补救措施	107
5.11 蒂昂热核电厂 3 号机组	107
5.11.1 传热管破裂原因	107
5.11.2 核电厂瞬态	108
5.11.3 操纵员行动	108
5.11.4 环境影响	108
5.11.5 补救措施	108
5.12 印第安角核电厂 2 号机组	109
5.12.1 传热管破裂原因	109
5.12.2 反应堆瞬态	109
5.12.3 操纵员行动	111
5.12.4 环境影响	111
5.12.5 补救措施	111
5.13 费森海姆核电厂 2 号机组	111
5.13.1 传热管破裂原因	112
5.13.2 环境影响	112
5.13.3 补救措施	112
5.14 圣奥诺弗雷核电厂 3 号机组	112
5.14.1 传热管破裂原因	112
5.14.2 核电厂瞬态	113
5.14.3 环境影响	113
5.14.4 经验教训	113

5.15 多起蒸汽发生器传热管破裂事件的总结	114
第六章 蒸汽发生器传热管破裂事故分析	118
6.1 SGTR 事故的机理和现象	118
6.2 SGTR 事故分析计算方法	119
6.3 典型核电厂 SGTR 的事故分析结果	119
6.3.1 美国 SURRY 核电厂	120
6.3.2 M310 堆型核电厂	131
6.3.3 VVER 堆型核电厂	143
6.3.4 API1000 型核电厂	155
6.3.5 EPR 型核电厂	165
6.4 蒸汽发生器传热管破裂事故的评估	173
6.5 SGTR 事故中操纵员动作	174
6.6 小结	175
第七章 蒸汽发生器传热管破损事件的风险评价	179
7.1 引言	179
7.2 堆芯损伤频率和风险评价	179
7.3 SGTR 风险贡献因素	182
7.4 SGTR 失效的风险重要度	185
7.5 安全壳旁通	186
7.6 传热管破损的条件概率	187
7.6.1 初因事件	187
7.6.2 分析方法	188
7.6.3 诱发 SGTR 概率的计算结果	190
7.6.4 确认和选择诱发 SGTR 事件的贡献因子	190
7.6.5 诱发 SGTR 的机理	191
7.6.6 诱发 SGTR 的安全壳旁通频率	194
7.7 SGTR 事故中的自然循环	194
7.7.1 自然循环流动的重要性	195
7.7.2 再循环蒸汽发生器的热管段反向流动	195
7.7.3 冷却剂环路流动	197
7.7.4 导致自然循环的序列	197
7.8 小结	198
第八章 不同国家监管实践和在役导则	199
8.1 传热管检查要求	199
8.1.1 美国传热管检查要求	200
8.1.2 捷克传热管检查要求	202
8.1.3 法国传热管检查要求	203
8.1.4 德国传热管检查要求	203
8.1.5 日本传热管检查要求	203

8.1.6	俄罗斯传热管检查要求	203
8.1.7	斯洛文尼亚传热管检查要求	203
8.1.8	西班牙传热管检查要求	203
8.1.9	瑞典传热管检查要求	204
8.1.10	瑞士传热管检查要求	204
8.1.11	EPRI 传热管检查建议	204
8.1.12	中国传热管检查要求	204
8.2	传热管维修准则	205
8.2.1	通用的在役准则	206
8.2.2	缺陷类型和位置相关的具体准则	206
8.3	不同国家传热管在役导则	208
8.3.1	美国监管实践和在役导则	209
8.3.2	美国传热管支撑板上外径 IGSCC/IGA 的在役导则	210
8.3.3	EPRI 建议的美国胀接过渡区内 PWSCC 的在役导则	213
8.3.4	美国其他在役导则	214
8.3.5	中国管理实践和在役导则	214
8.3.6	比利时管理实践和在役准则	216
8.3.7	加拿大在役准则	217
8.3.8	捷克管理实践和在役准则	219
8.3.9	法国管理实践和在役准则	219
8.3.10	德国监管实践和在役准则	220
8.3.11	日本监管实践和在役准则	221
8.3.12	俄罗斯监管实践和在役准则	221
8.3.13	斯洛文尼亚监管实践和在役准则	221
8.3.14	西班牙监管实践和在役准则	222
8.3.15	瑞典监管实践和在役准则	222
8.3.16	瑞士监管实践和在役准则	223
参考文献		224
缩略语		226

第一章 引言

在压水堆 PWR 和 CANDU 堆上使用的蒸汽发生器是一个大的热交换器,用来导出一回路反应堆的热量,其二次侧产生的蒸汽用来驱动汽轮机。每个反应堆有 2~6 台蒸汽发生器,但某些机组则多达 12 台蒸汽发生器。

蒸汽发生器是壳管式热交换器,有成千上万根传热管。一回路冷却剂流过传热管,将管外的二次侧水加热至沸腾而产生蒸汽。在正常运行期间,蒸汽发生器可以包络从活化产物或裂变产物释放到一回路冷却剂的放射性。一般来说,一回路冷却剂的压力高于二回路的压力,因此传热管的任何泄漏都是从一次侧到二次侧,并且传热管的破损将导致放射性物质通过二回路系统的压力释放阀释放到环境中。

对于压水堆而言,蒸汽发生器的传热管是一回路压力边界的重要组成部分,构成超过 50% 的一回路压力边界表面。为了实现有效的屏障,这些管道必须预防裂缝、穿孔和一般的降质。然而,在一些核电厂已发生过蒸汽发生器传热管的大面积降质。经研究,世界上约有一半的压水堆核电厂对蒸汽发生器传热管进行保养或维修。据不完全统计,美国早期核电厂约有 48 000 根蒸汽发生器传热管进行了衬管,每年传热管的堵管数量为 10 000~12 000 根。这意味着虽然大量的压水堆核电厂蒸汽发生器传热管带有缺陷或超过限值,但仍然维持运行。另外,一些新的蒸汽发生器传热管退化机理也已发现,其中有些并不容易探测到。

在美国核电厂运行早期,发生了 10 起自发的蒸发器传热管破裂事故(SGTR)。这些破损是由一系列的传热管退化机理引起的,包括传热管外表面应力腐蚀、高温疲劳、松动部件磨损、内表面的应力腐蚀以及耗蚀。10 起破损事故的泄漏率介于 425 L/min 和 2 900 L/min 之间,导致了操纵员不容易控制的复杂的核电厂瞬态。在部分案例中,核电厂操纵员花了很长的时间才意识到发生了 SGTR,因此在事件发生后很长时间才开始降功率和隔离缺陷的蒸汽发生器。在某些核电厂,相当长一段时间内,一回路冷却剂系统压力控制在缺陷蒸汽发生器二次侧压力之上,缺陷的蒸汽发生器发生满溢。某些核电厂的设计基准事故(如蒸汽管线的突然破裂)能导致二次侧快速卸压。当退化机理已严重损坏一定数量的传热管,这些事故期间产生的传热管内外压差可能同时导致一定量的传热管泄漏或破损。这些传热管的泄漏或破损导致一个比自发传热管破损瞬态更难控制的核电厂瞬态,释放到环境的放射性水平可能超过厂址限值。一些传热管的突然破损也导致了一回路冷却剂系统的快速卸压,这可能导致堆芯裸露,继而引起堆芯熔化。

通过适当地和及时地检查、堵管或在过量传热管破损后进行衬管,蒸汽发生器传热管失效的概率和后果能大大地减少。大部分蒸汽发生器在核电厂换料期间进行日常检查,这时使用非破坏性的检查手段检查其内部结构,对有缺陷的传热管进行修理或必要时进行堵管。

然而,蒸汽发生器传热管的检查要求和在役检查准则各国都不相同,这是因为:

(1) 不同蒸汽发生器的设计和材料、具体核电厂的厂址对不同类型的老化降质是有影响的。一些类型的降质易于探测或比其他类型的降质有更少的安全后果。

(2) 通过适当地检查和准则要求,蒸汽发生器和核电厂安全维持在适当水平。有些国

家选择更保守的准则和较少的检查,另外一些国家选择较宽松的准则(节省维修费用)和更多的检查。

(3) 随着问题的进展,检查的频次和内容也在增加。

不同国家使用的蒸汽发生器检测设备有很大不同。最广泛使用的检测技术涡流检测并不能探测所有尺寸的降质;另外,能探测某些特定降质的设备速度很慢,且价格昂贵。

蒸汽发生器的性能对核电厂的安全来讲非常重要。例如,美国不同核电厂的堆熔频率为 $3 \times 10^{-5}/(\text{堆} \cdot \text{年}) \sim 3 \times 10^{-4}/(\text{堆} \cdot \text{年})$ 。SGTR 事故对该值的贡献相对较小,但是由于放射性物质旁通安全壳,风险较大。审查美国 20 个压水堆的单个核电厂审查(IPE)项目也表明:压水堆中与 SGTR 相关的风险在 10% 以上,某些核电厂则更高。这些数据基于自发传热管破损的历史数据,不考虑降质蒸汽发生器发生诱发传热管破裂的可能性和在其他瞬态和事故期间放射性核素旁通安全壳。

本书主要关注蒸汽发生器完整性评价,重点介绍以下几个方面:

- (1) 蒸汽发生器的设计和重要部件;
- (2) 蒸汽发生器的降质和传热管破损;
- (3) 蒸汽发生器传热管缺陷检测;
- (4) 典型蒸汽发生器传热管破裂事件;
- (5) 蒸汽发生器传热管破裂的事故分析;
- (6) 蒸汽发生器传热管破裂事故的风险重要度分析;
- (7) 蒸汽发生器传热管的监督要求和不同国家的在役检查准则。

第二章 蒸汽发生器介绍

2.1 蒸汽发生器的设计功能

蒸汽发生器是核电厂一、二回路的枢纽,主要用来将一回路冷却剂中的热量传递给二回路的给水,使之产生蒸汽,驱动汽轮发电机发电。蒸汽发生器的传热管及管板是一、二回路介质的交界面,交界面的破损会造成放射性物质泄漏,对核电厂安全构成威胁。

根据核安全法规《用于沸水堆、压水堆、压力管式反应堆的安全功能和部件分级的规定》(HAF0201),蒸汽发生器的一次侧属于核安全一级,是反应堆冷却剂系统的重要部件,直接与核安全相关。根据压水堆核电厂的设备故障概率统计,蒸汽发生器故障居首位,因此蒸汽发生器的安全、可靠运行是核电厂安全性、经济性的保障,研究改善蒸汽发生器是完善核电厂安全运行技术的重要环节。

按照不同的划分方式,蒸汽发生器可分为不同的类型。按二回路介质在蒸汽发生器内的流动方式,分为自然循环、辅助循环和强迫循环蒸汽发生器;按传热管形状,分为 U 型管式、直管式、螺旋管式蒸汽发生器;按设备安装方式,分为立式和卧式蒸汽发生器;按结构特征,分为带预热器和不带预热器蒸汽发生器。

蒸汽发生器的设计满足如下功能:

- (1) 以反应堆冷却剂为热源,产生湿度不大于规定要求的出口蒸汽。
- (2) 蒸汽发生器二次侧的连续热排污能力。蒸汽发生器排污率可在规定时间(8 h)内使二次侧水质满足化学要求,并从冷备用状态转为热备用状态。
- (3) 二次侧水位显示。在热备用到满负荷过程中对水位的自动控制。
- (4) 在反应堆冷却剂与蒸汽发生器二次侧给水之间建立一个密封压力边界。
- (5) 在停堆时,正常运行工况下首先用主给水和启动给水系统或事故工况下用应急给水系统带走来自反应堆冷却剂中的衰变热,使一次侧冷却剂温度降到余热排出系统动作压力对应的饱和温度以下。
- (6) 在除氧和控制 PH 值条件下为蒸汽发生器提供满水湿保养。

2.2 蒸汽发生器设计所依据的规范和标准

目前美国的蒸汽发生器设计理念是根据美国机械工程师协会(ASME)等级 1 的设计要求来设计主回路侧的承压组件,而二次侧组件则需要满足 ASME 等级 2 的要求。然而,惯例是遵循 ASME 等级 1 的要求设计整个蒸汽发生器外壳。因此,ASME 第Ⅲ卷中的 NB-2300 条款用于确保蒸汽发生器中的所有承压材料应有足够的断裂韧性。蒸汽发生器的传热管/管板复合体满足 ASME 第Ⅲ卷规定的应力限制和疲劳标准。

我国核电厂蒸汽发生器设计依据的规范与标准如下:

秦山核电厂蒸汽发生器所有承压边界材料的选择和制造均符合美国机械工程师协会

(ASME)规范第Ⅲ卷的要求,传热管/管板焊缝符合 ASME 规范第Ⅲ卷和Ⅺ卷的要求。反应堆冷却剂压力边界铁素体材料的断裂韧性均符合 10 CFR 50 附录 G 和 ASME 规范第Ⅲ卷 NB-2300 的要求。

大亚湾、岭澳以及秦山第二核电厂的蒸汽发生器的设计规范依据法国《压水堆核岛机械设备设计和建造规则》(RCC-M),蒸汽发生器压力边界材料的选择和制造均符合 RCC-M 第Ⅳ卷的要求。按照 RCC-M 第Ⅳ卷要求,传热管密封焊在管板堆焊层上。铁素体材料的断裂韧性符合 RCC-M 1 级部件材料的断裂韧性要求。

田湾核电厂在充分考虑了 PGV-1000 蒸汽发生器(“187”系列)及其改进型 PGV-1000M 蒸汽发生器(“320”系列)(使用在俄罗斯、乌克兰、保加利亚的核电厂中)的设计、运行和保证其使用寿命的经验后,在蒸汽发生器研发的基本原则中对技术、设计、工艺以及运行特性进行了改进。对于蒸汽发生器的材料,专门编制了“结构材料的技术规范”,作为 PGV-1000M 蒸汽发生器设计的一部分。该文件对制造蒸汽发生器的所有母材与焊接材料进行了编号。对每一牌号的材料,规定了在物理冶金研究、选择及在试样进行试验期间的化学成分、机械性能、热处理以及各种检查的要求。

浙江三门和山东海阳核电厂 AP1000 机组中,蒸汽发生器构成部件按 AP1000 设备、抗震、ASME 锅炉和压力容器规范的分级。ASME 规范把二次侧分类为安全 2 级。蒸汽发生器的压力保持部分包括一次侧和二次侧压力边界,其设计满足 ASME 第Ⅲ卷安全 1 级的标准。压力边界材料的选择和构成符合 ASME 规范第Ⅱ、Ⅲ卷要求,材料的断裂韧性符合 10 CFR 50 附录 G、抗断裂韧性要求和 ASME 第Ⅲ卷 NB-2300 中规定的反应堆冷却剂压力边界上的铁素体材料的要求。传热管在管板堆焊层中的密封焊,符合 ASME 规范第Ⅲ、Ⅺ卷。

台山核电厂 EPR 机组的蒸汽发生器设计规范依据法国《压水堆核岛机械设备设计和建造规则》,蒸汽发生器一次侧和二次侧冷却剂压力边界的机械设计按 RCC-M 规范 1 级部件设计。根据 RCC-M 规范 B3000,按设计工况进行尺寸计算,以确定壳体、接管及传热管尺寸。所有压力边界材料的选择和制造应按 RCC-M 第Ⅱ卷要求,蒸汽发生器铁素体材料的韧性应满足 RCC-M 规范Ⅱ和 B2000 的要求。

2.3 典型核电厂蒸汽发生器的设计

2.3.1 美国压水堆自然循环蒸汽发生器

简化的压水堆自然循环蒸汽发生器截面图如图 2-1 所示。典型自然循环蒸汽发生器剖视图如图 2-2 所示。自然循环蒸汽发生器是一种直立、具有外壳、U 型传热管以及完整汽水分离装置的设备。大型圆筒形容器包围住倒置的 U 型管束,管束由几千根单独的 U 型管组成,在自然循环蒸汽发生器容器底部附近,每根传热管末端与一个厚金属板(称为管板)焊接的部位有一个孔洞。蒸汽发生器冷却剂通过一个入口接管进入半球形底部,流过 U 型管并在下部空腔经出口接管流出。在管板下面的下部腔室中,一块金属板将进入和流出的主冷却剂分隔开,并引导冷却剂流经传热管。

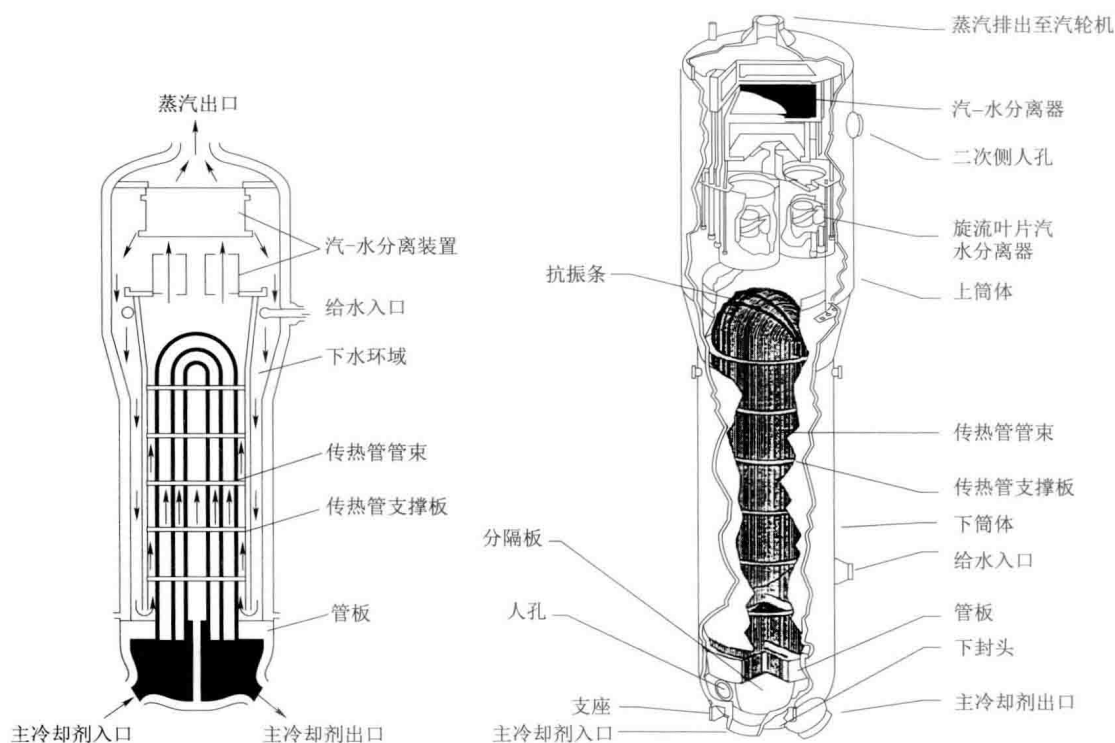


图 2-1 PWR 自然循环蒸汽发生器截面图

图 2-2 典型自然循环蒸汽发生器剖视图

传热管由若干金属隔板或方格形分压器支撑,这些金属板或分压器沿着传热管管束竖直分布,在多个位置固定,在管束 U 型弯曲区域有各种形状的条棒和小金属板。自然循环蒸汽发生器上部区域包括给水管道系统接管和不同的旋流型汽-水分离器以及蒸汽干燥器。制造材料主要是碳钢或低合金钢,与冷却剂接触的表面采取堆焊或覆盖耐腐蚀材料。

主冷却剂经热管段进入蒸汽发生器,温度为 $315\sim 330\text{ }^{\circ}\text{C}$;经 U 型管后离开蒸汽发生器进入冷管段,温度约为 $288\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。二回路系统水(给水)通过一个给水接管供给,至给水环,进入下水环,在下水环处,与汽-水分离器排出的自然循环水混合。下水环域中的水流至蒸汽发生器底部,在管板顶部穿过管束套筒,然后向上通过 U 型管管束,产生蒸汽。二回路给水每次通过蒸汽发生器时,大约有 25% 会转变为蒸汽;其余部分进行自然循环。蒸汽发生器一般是为生产额定饱和蒸汽而设计的,饱和蒸汽含水量低于 0.25% 质量分数。

有些自然循环蒸汽发生器包括回热环节(预热器),该装置属于一个独立隔段,位于蒸汽发生器冷管段出口附近,如图 2-3 所示。经过一个位于蒸汽发生器下部的接管,二回路给水流入预热器(这种蒸汽发生器没有给水环),辅助给水通过蒸汽发生器上部一个独立的接管注入。在二回路给水与二回路自然循环水混合前,蒸汽发生器中的主冷却剂热量预热给水至接近饱和温度。

表 2-1 列出了典型压水堆自然循环蒸汽发生器的设计特点,其中包括西屋 8 个型号、巴威 1 个型号和燃烧工程 2 个型号的产品。表 2-2 列出了三菱重工 7 个型号蒸汽发生器的设计特点。表 2-3 列出了西门子发电设备部(Siemens/KWU)蒸汽发生器的设计特点。西屋、法马通、三菱重工和西门子/KWU 设计的核电厂,根据其容量,每台机组拥有 2~4 个蒸汽

发生器(包括 2~4 个环路,每个环路有 1 个蒸汽发生器)。由于燃烧工程设计的核电厂机组只有 2 个蒸汽发生器,因此燃烧工程公司的自然循环蒸汽发生器较其他压水堆自然循环蒸汽发生器有更多数量的传热管。西屋、法马通和三菱重工的自然循环蒸汽发生器传热管以方形排列,而燃烧工程和西门子/KWU 的自然循环蒸汽发生器传热管以三角形排列。燃烧工程和西屋的蒸汽发生器传热管排列方式如图 2-4 所示。需注意的是,在最内部的 U 型管道之间,沿着蒸汽发生器中心下游有一个竖直开放的窄通道。

2.3.2 CPR1000 型压水堆的蒸汽发生器

CPR1000 型压水堆的蒸汽发生器为 55/19B 型具有内置汽-水分离装置的立式倒 U 型管蒸汽发生器,结构如图 2-5 所示。该蒸汽发生器具有以下设计特点:

(1) 在一次侧,半球形下封头由分隔板分隔成入口腔室和出口腔室,反应堆冷却剂通过位于蒸汽发生器半球形下封头上的进口接管进入腔室,流经倒 U 型传热管后,再经下封头上的出口接管流出。

(2) 在二次侧,给水经过给水接管进入蒸汽发生器。给水经过给水接管后进入给水环管,通过倒 J 型管喷出,然后流经管束套筒与壳体之间的环形通道。给水管组件的设计使在给水管中导致水锤发生的可能性降至最低。倒 J 型管焊接在给水管环上,大部分较冷的给水分配到传热管束的热侧,这样使传热管束两侧蒸发量大致相等,从而避免了两侧之间的热虹吸作用。

(3) 在管束套筒下部,二回路水通过流量分配挡板直接流向管束中心区。流量分配挡板的设置使二回路水以足够的流速有效冲刷管板表面,避免流体中腐蚀产物的沉积,从而减小管板表面以上管子腐蚀的危险。管廊阻挡块防止循环水流向旁路通道,给水进入管束,在这里被加热后蒸发形成饱和的汽水混合物。

(4) 汽水混合物从管束区上升到二次侧上部筒体内,进入汽-水分离段。在那里 16 个独立的旋叶式汽-水分离器对蒸发段产生的汽水混合物进行第一级汽-水分离。虽然旋叶式汽-水分离器可除去蒸汽中的大部分水,但是为满足设计要求,还需进行二级汽-水分离。二级汽-水分离器(干燥器)为六角形带钩波形板分离器,在六角形内部还有六块波纹形分离器。携带小水滴的蒸汽在干燥器中进一步除湿后,蒸汽品质提高到设计要求最小值 99.75%。汽-水分离器和干燥器分离出的水与进入蒸汽发生器的给水汇合,向下流入套筒与壳体之间的环形通道作再循环。

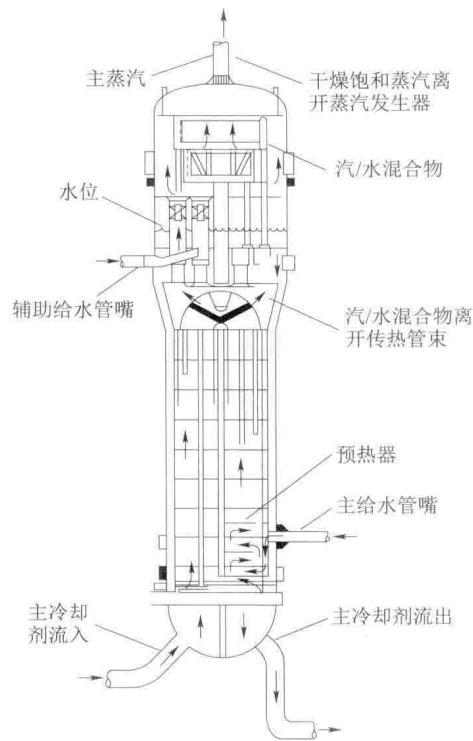


图 2-3 带预热器的蒸汽发生器典型设计