

# 核电站在役检查无损检测鉴定的现状及发展

钟志民

(国核核电站运行服务技术公司(核工业无损检测中心),上海 200233)

**摘要:**扼要地介绍了核电站在役检查无损检测鉴定工作的由来、作用及其发展的历史。重点介绍了美国、欧洲以及国际原子能机构等的相关工作现状,分析了不同鉴定体系的特点及其发展趋势以及我国在这一领域的相关工作历史和现状。分析表明,我国应积极推进相关工作,并建议在体系建设过程中,应注意鉴定目的与效果、技术和经济性等问题。此外,建议规范检测鉴定这一术语。

**关键词:**核电站;在役检查;鉴定

中图分类号: TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2010)05-0385-05

## The Art and Trend of NDT Qualification for Nuclear Power Plants In-Service Inspection

ZHONG Zhi-Min

(Nuclear Power Plant Service Company (Nuclear Nondestructive Testing Center), Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The cause, role and history of NDT qualification of in-service inspection of nuclear power plants were briefly introduced. The art of inspection qualification, methodology, requirements, character and tendency in USA, European and IAEA were described and analyzed in details. Then, discuss the related activities in china were discussed. It can be concluded that we shall promote the setting up of ourselves qualification system and pay attention to the balance of inspection qualification aims and results, technique and economic issue. Furthermore, recommends usage of the term of inspection qualification was recommended.

**Keywords:** Nuclear power plant; In-service inspection; Qualification

在役检查是保证核电站关键设备有高度的安全性和可靠性的重要措施之一。通常,狭义的核电站在役检查是指核电站在停堆换料期间,依据在役检查大纲,针对重要系统和设备进行的一系列有计划的无损检测和评价活动,主要使用目视、渗透、磁粉、超声、射线、涡流以及泄漏等无损检测方法,一般也包括为建立比较基准的役前检查活动。

在役检查过程中,无损检测技术的可靠性、结果的准确性和可跟踪性直接影响被检设备的结构完整性及其安全运行。例如,国内外核电发展史上,在研究试验及工程实践中都曾发生如下现象:按相应标准和程序进行在役超声检测,不同队伍检测同一部件的相同区域,检测结果存在显著差异并影响其评

收稿日期:2009-06-20

作者简介:钟志民(1974—),男,高级工程师,硕士,核电厂寿命评估中心副主任,主要从事核电设备无损检测技术、核电厂设备老化管理和寿命评估技术等的研究和应用工作。

价和处理。针对类似现象,诸多国家开展了大量工作,首先是建立无损检测人员资格鉴定体系,以减少人为因素的影响。但实践中发现,具有相应资质的人员使用合格的设备和有效的检测程序,也并没有明显缓解该现象的发生。因此,针对无损检测活动能否满足预期目的、满足结构完整性分析评价的要求、能否给用户以充足的信心等问题,许多国家、地区和组织开展了近30年的工作,并分别建立了无损检测鉴定(Inspection Qualification)的技术方法和组织管理体系。无损检测鉴定,是指通过各种能提供可靠证明的方法(如技术评价和实际测试等),对由检测人员、检测设备和检测规程构成的检测系统,开展系统性的评价活动,以证明检测系统在实际检测工况下具有满足期望的技术性能要求的能力<sup>[1]</sup>。其在鉴定的范围、作用和要求上与无损检测人员资格鉴定显著不同。

有关资料表明,在役检查无损检测鉴定活动的

开展,不但推动了检测技术的发展,更提高了诸如反应堆压力容器、管道等关键设备在役检查的可靠性,特别是缺陷检出率、缺陷尺寸测量的精度和准确度,对保障核电站安全经济运行起到了重要作用<sup>[2]</sup>。我国在核电事业蓬勃发展的今天,也应尽快建立相关鉴定体系、开展相关活动,为核电站的安全可靠运行提供技术保障。

## 1 发展历史

### 1.1 问题由来及“钢部件检测计划”

1970 年,美国机械工程师学会(ASME)发布《核电厂设备在役检查规则》,以规范核电厂在役检查活动。次年,美国压力容器研究委员会着手进行在役检查无损检测可靠性的研究工作。其研究结果表明“实际工作过程中,即使严格按照规范执行超声检测,其结果也不能完全满足规范质量要求,也不能完全实现最初制定规范时‘专家’所预期的目的”<sup>[3]</sup>。为此,在欧共体的支持下,十四个国家在 1974 年启动了著名的“钢部件检测计划( Programme of Inspection Steel Component, PISC)”<sup>[4]</sup>。该活动持续进行到 1993 年,分三个阶段,参加的组织不断增多,后来有 15 个国家约 50 多个机构参加。期间,我国没有相应机构正式参加该活动。

1979 年结束的 PISC-I 阶段工作成果表明,满足 ASME 规范 XI 卷要求的核电厂在役超声检测不能保证有效地检测出役致裂纹<sup>[3]</sup>。这一结果促进了 PISC-II 阶段工作的深入开展并推动了无损检测鉴定工作的发展。

美国、日本也参加了 1986 年结束的主要针对反应堆压力容器超声检测的 PISC-II 阶段活动。其结果表明,应基于缺陷特性改进检测程序并应重视真实缺陷特征对检测的影响和要求;改进检测方法、程序并严格规范检测活动在一定程度上可提高检测可靠性;开展“无损检测鉴定”活动可进一步提高检测可靠性并有一定的经济性;并促进了以下工作:

(1) ASME 规范 XI 卷超声检测的记录标准从 50%DAC 调整为 20%DAC,并增加 70°探头以检测近表面危害性裂纹类缺陷。

(2) 1989 年,ASME XI 卷中专门增加强制性附录Ⅷ,规定在役检查超声检测鉴定的相关要求。

1993 年结束的 PISC-III 阶段工作将鉴定和巡回测试活动推广至轻水反应堆一回路所有关键机械部件的在役检查。其重点研究活动包括<sup>[4]</sup>:

(1) 收集役致缺陷并将其与人工缺陷的检测响应比较,确定人工缺陷在鉴定过程中的可用性。

(2) 反应堆压力容器全范围检测验证 8 支队伍,按 ASME 规范,使用自动检测装置,模拟真实检测环境,对德国制造的含预埋缺陷的反应堆压力容器进行检测、解剖并分析对比。

(3) 管嘴异种金属焊缝检测 在 13 个国家依次对 4 个安全端焊缝试件进行检测。结果表明,缺陷的超声检出率和误判率达不到预期要求;焊缝熔融金属及隔离层中缺陷的检测和评判难度大;超声难以检出的危害性缺陷,使用高质量的 X 射线检测技术也难以检出。

(4) 一回路奥氏体钢管检测 25 个检测队伍参与该活动并进行了破坏性试验以统计检测可靠性。

(5) 蒸汽发生器传热管在役涡流检测<sup>[5]</sup> 10 个国家共 25 只队伍在训练试件和考试试件上分别进行检测。结果表明,能有效地检测内外壁超过 40% 壁厚深度的轴向缺陷;外壁接近或小于 20% 壁厚深度的轴向缺陷检测效果达不到预期目的;即使采用相同的检测技术和十分相近的检测程序,定量结果离散度也很大;虽难以制造自然役致缺陷,但也应开展鉴定活动以认清并提高检测能力。

(6) 无损检测数学模型的应用 8 个国家的 16 个组织研究了超声检测仿真软件的有效性、准确性及其在鉴定过程中的作用,认识并掌握了缺陷特征对超声检测响应的影响规律。

(7) 人为影响研究 重点研究了检测人员对检测结果的影响。其结果表明,检测校准过程、人员的性格、特定技术的熟练程度和工作环境对检测结果影响较大。

PISC-III 阶段工作最重要的成果是世界上核电厂在役检查界和相关的组织、机构都充分地意识到对关键设备所应用的无损检测系统进行鉴定是必要的,并推动了检测鉴定体系的建设。

### 1.2 独立鉴定机构的出现

20 世纪 80 年代初,英国开始 Sizewell B 压水堆核电站的建造。该电站虽基于 ASME 规范设计,但其核安全主管当局要求从制造阶段就应对“不能接受其失效”的部件的超声检测进行鉴定。1982 年,英国成立检测验证中心并作为独立机构开展相关鉴定活动<sup>[6]</sup>。其工作的一个重要结论是,经过培训并最终通过反应堆压力容器制造和在役超声检测

鉴定的检测系统,其缺陷检出率、缺陷测长、缺陷测高和定位的能力优于鉴定之前并优于没参加过鉴定活动的系统。

### 1.3 检测鉴定体系的建设

1992年,欧洲成立了ENIQ(European Network for Inspection and Qualification)组织。其目的是利用欧洲范围内的相关人力、物力资源,协调各成员国相关鉴定规范和标准,提升欧洲核电厂的安全。1995年,ENIQ发布《欧洲无损检测鉴定的方法》并规定鉴定过程中应进行技术评价,程序/设备鉴定与人员鉴定应分开进行而且程序/设备鉴定应采用明测。随后,ENIQ工作指导委员会组织开展了第一次试点研究活动以评价该方法的成效。1997年,发布第二版鉴定方法。2000年到2006年,组织开展了第二次试点研究活动并在2007年发布第三版鉴定方法<sup>[7]</sup>。此外,从1999至今,ENIQ共发布了10个推荐操作规程,该系列文件分别从技术评价内容、关键/非关键参数、技术评价策略、鉴定档案内容、考试试块设计和操作考试、检测模型的使用、鉴定机构的一般要求、资格鉴定等级和方法、风险导向的在役检查(Risk-Informed In-Service Inspection, RI-ISI)大纲中使用的结构可靠性计算模型及相关软件的测试和验证、RI-ISI中专家小组工作导则共10个方面进行了详细的规定。

此外,日本、法国、韩国、瑞典、捷克、德国、西班牙等都根据本国的实际情况逐步建立了自己的核电站在役检查无损检测鉴定体系。

## 2 国外检测鉴定的现状及发展趋势

### 2.1 美国相关工作的现状和特点

美国商用核电站的主流堆型包括压水堆和沸水堆,其在役检查无损检测工作至少应满足ASME锅炉压力容器规范XI卷的相关要求<sup>[8]</sup>。该卷强制性附录中规定,以下被检对象及其检测系统,应进行检测鉴定[XI卷中称之为能力验证(Performance Demonstration)]:

(1) 反应堆压力容器、其他压力容器、管道的焊缝,螺栓和螺柱等的在役超声检测系统;

(2) 用作表面检验的涡流检测系统。

美国电力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)作为独立鉴定机构负责鉴定活动的组织和实施,其发布的蒸汽发生器在役检查导则中详细规定了其涡流检测和超声检测鉴定的相关

要求<sup>[8]</sup>。

ASME锅炉压力容器规范XI卷规定的鉴定方法和要求主要有以下特点:

(1) 依靠具有代表性的考试试样(如规程鉴定用、长度定量鉴定用、高度定量鉴定用)对检验程序、检测人员进行“盲测”,即检测人员不知道试样中缺陷的情况;考试试样数量较多,其缺陷数量、特征、分布有明确的要求。

(2) 采用基于统计方法的判定准则评判检测系统是否通过鉴定,如利用缺陷检出率和误判率判定检测能力,利用缺陷长度或高度测量的均方根偏差判定定量能力。

(3) 对采用何种检测技术(如接触法、水浸法等)和是否采用特殊技术(如聚焦、相控阵等)不加要求,强调鉴定结果在统计意义上应能证明检测系统是否达到预期的检测能力,满足检测要求。

(4) 鉴定过程中,不要求对无损检测工艺进行技术评价。

(5) 鉴定机构一般只给出鉴定是否合格的反馈而不给出系统改进的针对性建议和意见。

(6) 只对关键部件、检测结果及其可靠性难以满足要求的超声、涡流检测系统进行鉴定。

### 2.2 美国相关工作的发展趋势

目前,ASME锅炉压力容器规范XI卷规定的鉴定方法和原则,已逐步推广至通用方法卷,如ASME锅炉压力容器规范第V卷超声篇中针对特殊技术(如超声衍射时差法)或特殊部位(如管座内圆角区)检测的鉴定要求。此外,EPRI正在关注鉴定条件与现场实施工作时条件的差异,计划出版有关技术导则,规定现场实施的有关条件、检测计划、准备工作、人因等内容,以进一步提高鉴定合格系统在现场实施条件下达到预期目的的能力。

### 2.3 ENIQ相关工作现状和发展趋势

国际原子能机构规定的无损检测鉴定方法与ENIQ方法大体相同,ENIQ的推荐操作规程同样是其实施过程中主要参考文件,因此笔者重点介绍被多个欧洲国家采用的ENIQ方法体系。

ENIQ的鉴定方法是一种适应性强的框架性方法。目前该方法不仅适用于核工业,也可用于其他工业;不仅适用于在役检查,也可用于制造、安装检查。采用该方法时,各国可以根据自身特点、法律法规和规范要求进行细化和调整以适应自身情况。

ENIQ无损检测鉴定的主要工作过程如下<sup>[9]</sup>:

(1) 由用户根据检测目的和要求编写检测技术规格书,其重点是明确鉴定的目标、何部件、何条件下、何方法、检测何特征的缺陷。

(2) 独立的鉴定机构根据检测技术规格书编制鉴定规程并提交用户审核,鉴定规程中应明确技术评价以及检测规程评价方法、如何进行操作考试、考试试样的详细情况(“盲测”部分必需保密)以及鉴定结果的评价原则。

(3) 鉴定机构根据鉴定规程,一般通过技术评价、操作考试两个阶段,对检测规程、检测设备、检测人员(一般是利用已鉴定合格的规程和设备)进行鉴定。

分析 ENIQ 的无损检测鉴定方法,可知其主要有以下特点:

(1) 强调技术评价的重要性。实践证明这是保证鉴定质量的前提下,减少试样、适应多变的检测参数、降低鉴定成本的有效措施。

(2) 考试试样的设计理念是基于最恶劣的检测情况,即根据检测技术规格书设计不利于检测的某些考试用缺陷(如与欲检出的缺陷具有相似的检测响应但高度或尺寸小于临界尺寸)。若鉴定合格,则表明所鉴定的检测系统能提供所期望的可靠性。

(3) 技术评价和操作考试的灵活结合,既保证了鉴定质量,又有一定的灵活性和广泛的适应性,但也给人员的理解、具体工作的执行带来了不便。

(4) 检测规程和设备的鉴定采用“明测”,有利于改进规程。人员及系统鉴定采用“盲测”,避免了设备和规程的影响,保证了鉴定结果的可用性。

2008 年 10 月,来自 19 个国家的代表在维也纳的国际原子能机构总部召开了第三届国际无损检测鉴定机构专题讨论会。该会议讨论了现有 ENIQ 方法在实施过程中的不足以及检测鉴定的发展方向,建议加强其在风险导向的检测活动、新电站建造以及关键部件更换、设备结构完整性评价以及电站延寿活动中的应用。

### 3 我国的相关工作

#### 3.1 历史和现状

我国从 20 世纪 90 年代初就开始关注相关活动。虽然由于种种原因,我国没能全面参加 PISC 活动,但有关单位、组织和机构通过科学访问、技术交流、专题研讨会和技术合作等方式促进相关工作的开展并一直积极跟踪国际上的进展情况。其中,

主要有 20 世纪 90 年代末、本世纪初,国家原子能机构、中核集团等单位组织相关单位与英国检测验证中心的技术交流、访问活动以及 2006~2008 年间 IAEA 与中国开展的“核电站在役检查无损检测技术验证”技术合作项目。在后一项目中,原国防科工委、核安全局、国家原子能机构、核电站代表、无损检测公司等一起与英国、瑞典专家合作,进行了反应堆压力容器安全端焊缝超声检测鉴定的试点活动,积累了一定的经验。

此外,我国已建立了民用核承压设备无损检测人员资格鉴定体系,也开展了民用核承压设备无损检测单位资格许可的工作。在检测单位资格许可工作过程中,开展了一些模拟活动,这对了解无损检测实施单位的技术能力、组织管理能力并促进其提高起到了一定的作用。

上述活动,对提升我国核电在役检查能力、促进我国核电在役检查无损检测鉴定体系的建立起到了积极的作用。业界已充分认识到,这一工作不但是核电站相关工程实践的需要,更是独立自主建设我国核电规范体系,打破核电发达国家技术垄断的需要,是保证核电站安全经济运行的必要措施之一。相关工作也正在有关管理部门的领导下积极推进和开展,但我国目前还没有建立核电站在役检查无损检测鉴定体系,也没有实施自主的鉴定活动。

#### 3.2 建议

建立核电厂在役检查无损检测鉴定体系并开展相关活动,有其现实需求和作用,更应与我国核电发展的现状相结合,不但要有相应的制度、组织基础,更要建立相应的技术基础,还应考虑鉴定工作的目的、效果及其技术性、经济性的平衡。

(1) 我国核电站类型较多。不同类型核电站的设计规范不同,其在役检查要求不同,无损检测鉴定的要求,如鉴定的适用范围、鉴定的内容、考试合格标准以及组织管理要求等也有显著不同。鉴于我国核安全监管体系中顶层文件多参照 IAEA 相关文件,建议参考 IAEA/ENIQ 方法建立顶层的框架性、原则性、指导性的方法,而后依据各电站适用的在役检查规范建立操作层面的技术导则或程序,实现适应性、灵活性、针对性的有机结合。

(2) 依法成立鉴定机构或鉴定工作指导委员会。核电无损检测工作是专业性极强的综合性工作,鉴定过程中会涉及被鉴定方的技术秘密或专有技术。因此,鉴定机构或鉴定工作指导委员会及其