

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 20431—2017

压水堆核电厂钢制安全壳结构整体性试验

Structural integrity test of steel containment vessel
for pressurized water reactor power plants

2017-04-01 发布

2017-10-01 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 通用要求 1

5 试验设备和仪器 3

6 试验准备 4

7 试验实施 7

8 试验结果的评定与验收 9

9 试验报告 10

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由能源行业核电标准化技术委员会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：国核电站运行服务技术有限公司、中广核工程有限公司、上海核工程研究设计院、国核工程有限公司、山东核电设备制造有限公司、中冶建筑研究总院有限公司。

本标准主要起草人：钟志民、马先宏、杨炯、贾武同、杨中伟、晏桂珍、柳胜华、林松涛、王永焕、杜炎刚、李锴、张亚平、王东辉、张静、褚凯。

压水堆核电厂钢制安全壳结构整体性试验

1 范围

本标准规定了压水堆核电厂钢制安全壳结构整体性试验的试验方法、技术要求和验收标准。

本标准适用于压水堆核电厂钢制安全壳结构整体性试验。其它堆型核电厂钢制安全壳结构整体性试验可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

NB/T 20003.7—2010 核电厂核岛机械设备无损检测 第7部分:目视检测

NB/T 20003.8—2010 核电厂核岛机械设备无损检测 第8部分:泄漏检测

HAF 602 民用核安全设备无损检验人员资格管理规定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钢制安全壳 steel containment vessel

核电厂安全壳的一种类型,一般采用低合金钢制造,是阻止放射性物质向环境释放的最后一道屏障,同时也是最终热阱的非能动安全级换热界面,包括安全壳容器和与安全壳容器本体相连的贯穿件或附件。

3.2

安全壳结构整体性试验 structural integrity test of containment

向安全壳内部充干燥空气加压至设计规定的试验压力并测量安全壳结构响应的一种试验,用于评判安全壳是否符合设计要求。

4 通用要求

4.1 试验目的

钢制安全壳结构整体性试验的目的是验证钢制安全壳的结构强度是否满足设计要求,检验钢制安全壳设计基准事故工况下保持结构完整性的能力。

4.2 试验压力

试验压力指结构整体性试验时安全壳内所达到的最大压力,一般为1.1倍~1.15倍安全壳设计压力。

4.3 试验内容和方法

4.3.1 整体性试验

钢制安全壳结构整体性试验包括安全壳结构变形监测、外观检查和泄漏检查等试验内容。

4.3.2 安全壳结构变形监测

应在设计要求的测点位置上监测安全壳结构的整体变形、表面应变等反映安全壳变形情况的参数，并且应同步记录安全壳壳内相对压力和环境温度，监测安全壳在各级压力平台下的结构响应。其中：

- 应选择位移传感器测量安全壳变形，安全壳变形测量系统性能应满足 5.2.1.1 的要求；
- 应使用三轴应变花测量安全壳应变并由数据采集和分析软件实时给出主应变数值，应变测量系统应满足 5.2.1.2 的要求；
- 应选择合适的温度传感器测量环境温度和安安全壳本体温度，如使用电阻式温度传感器，则应采用三线制或四线制接法，温度测量系统应满足 5.2.1.3 的要求；
- 至少采用 2 个量程相同的相对压力表或绝对压力表测量试验过程中的压力变化，压力表性能应满足 5.2.1.4 的要求。

4.3.3 外观检查

4.3.3.1 安全壳外观检查宜符合 NB/T 20003.7—2010 的规定。

4.3.3.2 应在安全壳加压之前对安全壳内外表面的可达区域，包括 7.5.2 规定的检查区域，进行外观检查。

4.3.3.3 应在降压阶段的安全壳设计压力平台上，在安全壳外部对 7.5.2 规定的检查区域进行外观检查。

4.3.4 泄漏检查

应在降压阶段的安全壳设计压力平台上，对本标准 7.5.2 规定的检查区域进行泄漏检查。泄漏检查宜采用气泡法并宜符合 NB/T 20003.8—2010 的要求。

4.4 人员资格

4.4.1 执行钢制安全壳外观检查和泄漏检查的人员宜按照 HAF 602 的要求取得相应资格证书，从事和该资格等级相应的检查工作并负相应的技术责任。

4.4.2 执行安全壳结构变形监测的人员应经过相应培训，具备传感器安装、测量系统调试和数据采集分析的能力并得到授权。

4.5 文件要求

4.5.1 基本要求

钢制安全壳结构整体性试验应按照有效的试验技术规格书和试验程序实施。

4.5.2 试验技术规格书

试验技术规格书应规定试验的具体要求，至少应包括以下内容：

- a) 试验先决条件；
- b) 测量参数和测点位置；
- c) 测点定位允许误差；
- d) 位移和应变测点的理论计算值；
- e) 对测量精度的要求；

- f) 数据采集要求;
- g) 加压与卸压速率及试验平台要求;
- h) 试验异常情况的处理原则;
- i) 外观检查和泄漏检查要求;
- j) 验收准则;
- k) 最多允许试验次数。

4.5.3 试验程序

试验程序用于指导试验和检查的实施和操作,可分成多份文件,至少应包含以下内容:

- a) 适用范围;
- b) 试验或检查的目的和方法;
- c) 引用的标准、文件;
- d) 使用的设备、耗材和工具;
- e) 人员要求、资格和责任;
- f) 试验或检查的先决条件;
- g) 工作步骤及技术要求;
- h) 记录要求及记录表格;
- i) 验收准则(如适用);
- j) 编制、审核和批准的签字;
- k) 编制、审核和批准的日期;
- l) 程序编号。

4.6 环境条件

4.6.1 试验期间安全壳的环境温度应满足设计要求。设计无要求时,安全壳结构整体性试验宜在外部环境温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行,但应采取适当措施保证试验期间安全壳内部温度不低于金属最低使用温度(一般比容器器壁金属无塑性转变温度至少高 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$)以避免低温脆断失效。

4.6.2 试验不宜在狂风、暴雨、闪电等恶劣天气条件下进行。

5 试验设备和仪器

5.1 加压系统要求

5.1.1 功能要求

加压系统的过滤器应能将颗粒直径大于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的粉尘过滤掉99%,干燥后的压缩空气露点温度不高于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.2 系统仪表

加压系统宜配备监测压力、流量和温度的仪表且都应在检定有效期内。

5.2 测量系统和仪器

5.2.1 性能要求

- 5.2.1.1 位移测量系统的绝对误差不应大于 $\pm 0.5\text{ mm}$ ，分辨率小于等于 0.1 mm ，量程上限大于等于理论计算结果的3倍。
- 5.2.1.2 应变测量系统的综合误差应小于等于最大测量值的2%，分辨率小于等于 $1\mu\epsilon$ ，量程上限应大于 $2000\mu\epsilon$ 。
- 5.2.1.3 温度测量系统的综合误差不应大于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，分辨率小于等于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，量程至少应覆盖 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- 5.2.1.4 试验压力可采用相对压力表进行测量。其测量绝对误差不应大于 $\pm 0.5\text{ kPa}$ ，分辨率小于等于 $\pm 0.1\text{ kPa}$ ，量程上限应为1.5倍~3倍的试验压力。
- 5.2.1.5 如果采用绝对压力表测量试验压力，其性能指标应不低于5.2.1.4的要求。

5.2.2 仪器检定和校准

测量用传感器和仪表在使用之前应由计量部门检定或校准合格且在有效期内使用。

5.3 数据采集系统

- 5.3.1 试验用数据采集系统应能读取、显示和记录试验数据，并能根据需要设置采集频率。
- 5.3.2 数据采集系统应具备如下功能：
 - a) 能实时处理采集的数据并提供下列结果：
 - 1) 指定时间的测量数据；
 - 2) 测量数据随时间变化的图表；
 - 3) 各测点变形和应变随压力变化的图表。
 - b) 能实时对比分析应变和变形的理论分析结果与实测结果。
 - c) 当试验触发7.7所列条件时，数据采集系统应能够发出警报。

5.4 外观检查工具

外观检查所用工具宜满足NB/T 20003.7—2010中4.4的要求。

6 试验准备

6.1 测点布置

6.1.1 整体变形测点

- 6.1.1.1 在安全壳筒体段的下述位置应布置整体变形测点：

- a) 相邻两整圈加强部位的中间标高处；
- b) 最上方整圈加强部位与筒体段顶端的中间标高处；
- c) 最下方整圈加强部位与筒体段底段的中间标高处。

- 6.1.1.2 在顶封头的下述位置应布置整体变形测点：

- a) 顶封头中心点；
- b) 顶封头高度 $1/2$ 所在标高处；
- c) 经计算分析，在最高试验压力下内凹最大处。

- 6.1.1.3 筒体段变形的测量方向可选取安全壳径向。顶封头变形的测量方向可选取竖直方向或测点处的垂直方向。

- 6.1.1.4 除顶封头中心点以外，同一标高上的测点数量应大于等于4个。测点等间距布置，测点方位角间距之差应小于等于 5° 。

6.1.1.5 不同标高的测点，应尽量布置在相同的方位角上。

6.1.1.6 测点实际位置与设计位置在方位角上的偏差应小于等于 0.5° ，标高上的偏差应小于等于 100 mm。

6.1.2 局部变形测点

6.1.2.1 对于安全壳建造尺寸偏差超出允许范围的区域，应设置局部变形测点监测该区域在试验期间的变形，其验收准则由设计方另行规定。

6.1.2.2 如果设计方另有规定，可临时增加局部变形测点并应给出所增加测点处的理论计算结果。

6.1.3 应变测点

6.1.3.1 整体应变测点可在同一标高上对称布置，测点数量应大于等于 4 个，测点方位角间距之差应小于等于 5° 。测点标高可根据理论计算结果选择。不同标高的测点，应尽量布置在相同的方位角上。

6.1.3.2 经计算分析后，应力集中区域应布置应变测点，如设备闸门、人员闸门邻近区域。

6.1.3.3 贯穿件、附件板等结构不连续区域，距离其中心 1.5 倍边长或直径范围内，不宜布置应变测点，除非计算模型中已考虑结构不连续的影响。

6.1.3.4 如果设计方另有规定，可临时增加应变测点并应给出所增加测点处的理论计算结果。

6.1.4 温度和压力测点

6.1.4.1 安全壳内部温度测点应至少分布在 3 个不同的标高上。测点标高范围应大于安全壳高度的 70%，标高间距应尽量均匀。

6.1.4.2 安全壳壳外温度测点应布置在与应变测点相同标高处。同一标高上，至少在安全壳外表面和距离安全壳外表面 500 mm 以外的悬空位置，各布置一个温度传感器。

6.1.4.3 温度测点的位置应尽量远离热源。

6.1.4.4 壳内压力测量宜靠近试验用的机械或电气贯穿件并从该贯穿件引出被测气压或测量信号到壳外。

6.2 试验先决条件

6.2.1 机组状态

6.2.1.1 试验应在安全壳的所有焊接作业、焊后热处理及无损检测（包括连接板的焊接）完成之后进行。

6.2.1.2 试验前所有穿过安全壳壳体的系统，包括安全壳隔离阀门在内，都应形成正式的密封边界。

6.2.2 设备保护要求

6.2.2.1 为防止工艺设备介质外漏及损坏，应将安全壳内的所有工艺设备与安全壳内大气相通，使其在试验过程中内外压力始终保持平衡。

6.2.2.2 安全壳内所有不能承受外部压力的设备部件及结构整体性试验期间有可能受损的设备部件，如水箱、容器或其他保压物项，在试验时也应与安全壳内大气相通。

6.2.2.3 对于有可能被压坏而又无法与安全壳大气连通的设备，试验期间不宜留在安全壳内。

6.2.2.4 壳内易燃物应移出安全壳。

6.2.2.5 应对试验设备、仪器采取防水、防雷击等保护措施，确保其正常工作。

6.2.2.6 应拆除与承压构件相连接的膨胀节临时约束件。

6.2.2.7 安全壳壳体与其他未附着在安全壳上的构筑物或临时结构的间距不宜小于 50mm。

6.2.2.8 安全壳贯穿件在安全壳径向上与其它未附着在安全壳上的构筑物或临时结构的间距不宜小于 50 mm。

6.2.2.9 安全壳贯穿件与屏蔽墙上套管的间距不宜小于 20 mm。

6.2.3 试验测量系统

试验开始前, 试验用测量系统应完成安装调试。

6.2.4 可达性

试验开始前, 应确认安全壳外观检查区域的可达性。

6.3 试验条件确认

安全壳加压之前, 应再次对6.2规定的先决条件进行确认, 以确保所有准备工作均已完成。

6.4 测量有效性确认

6.4.1 变形测量有效性确认

试验前, 分别对所有已安装的安全壳变形测量装置施加一个已知位移量, 施加的位移方向应与测量方向相同。若测量结果与施加的已知位移量偏差小于0.5 mm, 则认为变形测量有效。

6.4.2 应变测量有效性确认

应变测量有效性通过7.1中的预试验进行判断。若预试验中应变测量与安全壳内部压力之间呈线性关系, 则认为应变测量有效。

6.4.3 温度测量有效性确认

6.4.3.1 温度测量有效性通过一个能够独立显示温度测量结果的温度测量仪进行确认, 该温度测量仪应在检定有效期内。

6.4.3.2 将温度测量仪的探头靠近已安装的温度传感器。对于悬空的温度传感器, 两者距离应小于 1 m; 对于粘贴在安全壳外表面的温度传感器, 温度测量仪的探头同样应紧贴在安全壳外表面上, 距离应小于 0.5 m。

6.4.3.3 温度测量仪与试验用温度传感器的温度测量时间差不应大于 5 min。

6.4.3.4 若温度测量仪与试验用温度传感器的测量结果之差小于 1 °C, 则认为温度测量有效。

6.4.4 压力测量有效性确认

6.4.4.1 压力测量有效性通过一个独立标定的且在检定有效期内的压力表进行确认。

6.4.4.2 将试验用压力表与检验用压力表接入同一气源。调节气源压力, 至少在 5 个压力平台上进行压力测量, 最高平台上的压力应大于试验最高压力。

6.4.4.3 在各级压力平台上, 试验用压力表的读数与检验用压力表的读数之差不应大于 1 kPa。

6.5 不可达区域的处理

6.5.1 不可达变形监测点

对于受实际条件限制无法接近的整体变形测点, 可在与该测点相同标高处的可达区域内, 选取与该测点最近的可达位置作为替代测点并由设计方给出替代测点处的理论计算结果。

6.5.2 不可达焊缝

安全壳在建造时由于焊接接头被混凝土所覆盖或其它原因造成不可达时，如果满足下述条件，在试验期间，不可达承压焊缝可免除检查：

- a) 在混凝土里没有埋置孔道或贯穿件；
- b) 接管被整体补强且用全焊透焊缝与壳体连接；
- c) 在被混凝土覆盖或造成不可达之前，焊接接头已通过射线检测或超声检测；
- d) 在被混凝土覆盖或造成不可达之前，焊接接头已通过气密性试验，如卤素检漏试验或真空盒试验。

7 试验实施

7.1 加压前的外观检查

安全壳加压之前应按4.3.3.1要求进行外观检查。检查范围应包括安全壳可达的内外表面、人员闸门、设备闸门和贯穿件等部件的承压焊缝及6.2中应通过外观检查确认的先决条件，并按7.6.3的要求记录检查结果。外观检查发现的所有异常情况，包括影响安全壳结构整体性试验的情况及受安全壳结构整体性试验影响的情况，都应在执行预试验前评估并处理。

7.2 预试验

7.2.1 安全壳加压之前应进行预试验，按一定时间间隔采集数据，检验测量系统的稳定性，同时观测温度变化对安全壳变形及应变的影响。

7.2.2 预试验的最高压力为试验压力的0.1倍。

7.2.3 预试验压力平台的保压时间不小于15 min。

7.2.4 预试验的加压速率和卸压速率不宜超过17.5 kPa/h。

7.3 安全壳加压和卸压

7.3.1 加压过程

7.3.1.1 安全壳加压分两个阶段完成。

7.3.1.2 第一阶段，将压力加至0.5倍试验压力，加压速率不宜超过35 kPa/h。

7.3.1.3 第二阶段，每级增加0.1倍试验压力，逐级增加至试验压力，加压速率不宜超过17.5 kPa/h。

7.3.1.4 每级压力平台的保压时间应不小于15 min，同时应不小于数据采集间隔时间的2倍。

7.3.1.5 在进行下一级加压之前，应对安全壳变形、应变测量和外观检查结果进行分析和评估，确认无异常后再进行加压。

7.3.2 卸压过程

7.3.2.1 在试验压力平台上保持规定的时间后，即可开始卸压。首先将压力卸至安全壳设计压力，卸压速率不宜大于17.5 kPa/h。

7.3.2.2 如果在安全壳结构整体性试验之后开展安全壳整体泄漏率试验，则此后的压力控制按照泄漏率试验的要求进行，否则继续以不大于17.5 kPa/h的卸压速率降至安全壳内外气压平衡。

7.4 数据采集

7.4.1 预试验阶段及加压阶段，数据采集频率宜设为 5 min 一组。卸压阶段，数据采集频率可设为 20 min 一组。

7.4.2 卸压结束后，应继续监测安全壳变形至少 24 h。此阶段的数据采集频率可设为 1 h 一组。

7.5 试验过程中的检查

7.5.1 试验过程中，加压阶段的每级压力平台上，不包括试验压力平台，在安全壳外部按 4.3.2 的要求对安全壳机械贯穿件膨胀节进行外观检查。达到试验压力后卸压至设计压力平台上，按 4.3.2 和 4.3.3 的要求对 7.5.2 规定的检查区域进行外观检查和泄漏检查。

7.5.2 检查区域包括：

- a) 安全壳筒体、封头的壳板连接焊缝；
- b) 电气贯穿件和机械贯穿件的套筒与插板之间的连接焊缝；
- c) 电气贯穿件和机械贯穿件的插板与安全壳壳体之间的连接焊缝；
- d) 电气贯穿件组件和机械贯穿件组件的承压焊缝；
- e) 设备闸门和人员闸门与插板之间的连接焊缝；
- f) 设备闸门和人员闸门的插板与安全壳壳体之间的连接焊缝；
- g) 人员闸门套筒、筒节上的承压焊缝（如适用，且在前期未进行过压力试验）
- h) 设备闸门盖板上的承压焊缝；
- i) 燃料运输通道上的承压焊缝；
- j) 其他属于钢制安全壳压力边界范围但在前期未进行过压力试验的承压焊缝。

7.6 记录要求

7.6.1 应记录初始状态、各级压力平台及试验结束后的变形和应变测量结果；

7.6.2 应记录并保存测量系统在试验期间采集的全部数据；

7.6.3 应记录安全壳外观检查和泄漏检查所发现的缺陷尺寸、位置等信息；

7.6.4 应记录试验期间的异常情况及处理措施，如传感器失效、试验压力异常波动等。

7.7 试验中止和恢复

7.7.1 当安全壳内压力大于壳外大气压时，如果壳内温度低于安全壳服役期间的金属最低使用温度，则应立即暂停加压/卸压，直至温度恢复之后，方可恢复加压/卸压。

7.7.2 当任一变形测点、应变测点的测量结果呈加速增长趋势时，试验应立即中止加压。如为传感器或采集系统原因，排出故障后恢复试验；如为其他原因，应分析评估后判定。

7.7.3 当传感器读数未能被正常采集，或读数发生突变时，试验应立即中止。

7.7.4 加压或保压过程中，如安全壳内部压力意外下降大于 0.02 MPa，试验应立即中止。确认原因并排除故障后，评估是否可恢复试验。

8 试验结果的评定与验收

8.1 试验结果分析与评定

8.1.1 应将试验结果与理论计算结果对比分析。

8.1.2 对试验结果进行分析评定时，应确认温度变化对安全壳变形及应变的影响并剔除其影响。

8.2 验收准则

8.2.1 安全壳结构强度验收准则包括:

- a) 安全壳变形测量结果应满足设计要求,即各级压力平台上的变形响应为线性响应且卸压后的残余变形量满足设计要求;
- b) 试验压力平台下,根据应变花测量结果计算得出的应力强度不得大于安全壳材料的屈服强度。

8.2.2 试验期间安全壳外观检查区域未发现可见缺陷。

8.2.3 7.5.2 规定的检查区域未发现泄漏。

8.3 缺陷处理

8.3.1 试验过程中发现的泄漏点应在试验中止后进行修复。

8.3.2 外观检查发现的缺陷应进行评估,如有必要,则应进行修复。

8.3.3 修复工作完成后,将修复结果提交设计方评估。

9 试验报告

试验报告至少应包含下述内容:

- a) 引言;
 - b) 所参照的试验和检查程序;
 - c) 电厂及安全壳的基本信息;
 - d) 试验前安全壳的结构状态;
 - e) 试验测量系统组成及测点位置;
 - f) 试验用测量仪器的性能参数;
 - g) 测量系统在试验期间的异常状况;
 - h) 试验方法及试验过程;
 - i) 各压力平台及卸压后的测量数据;
 - j) 验收准则;
 - k) 安全壳外观及泄漏检查结果;
 - l) 结果的评价和结论;
 - m) 参加试验的人员及其职责;
 - n) 报告编号;
 - o) 编制、审核和批准的签字;
 - p) 编制、审核和批准的日期。
-