

中 华 人 民 共 和 国 能 源 行 业 标 准

NB/T 20017—2010
代替 EJ/T 1098-1999

压水堆核电厂 安全壳结构整体性试验

Structural integrity test of containments for pressurized
water reactor power plants

2010 - 05 - 01 发布

2010 - 10 - 01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 试验目的 1

4 试验依据的基本条件 1

5 试验压力 2

6 测试项目 2

7 测点布置 3

8 试验技术要求 5

9 试验验收条件及复试 7

10 试验承担单位的资格要求 7

11 试验前的准备工作 8

12 试验的实施步骤 8

13 试验报告 9

附录 A（资料性附录） 加压、减压曲线图 11

附录 B（资料性附录） 利用铅垂线法测量安全壳整体变形示意图 12

附录 C（资料性附录） 利用水准仪测量穹顶挠度 13

附录 D（资料性附录） 几种埋入式混凝土应变计定位方法 14

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准代替 EJ/T 1098-1999 《压水堆核电厂安全壳结构整体性试验》，与 EJ/T 1098-1999 相比主要有以下变化：

- 在安全壳整体变形测量项目中，增添了穹顶相对环梁的挠度测量；
- 增加了灌浆钢束力值测量项目；
- 对于灌浆钢束，增设了环向束、穹顶束的力值测量项目。

本标准由中国核工业集团公司提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：中冶集团建筑研究总院。

本标准主要起草人：林松涛、王永焕、张际斌、杨林、谢永金。

EJ/T 1098 于 1999 年 4 月首次发布。

压水堆核电厂 安全壳结构整体性试验

1 范围

本标准规定了安全壳结构整体性试验的方法、技术要求和验收评定条件。

本标准适用于压水堆核电厂有粘结预应力混凝土带有钢衬里的安全壳结构整体性试验,适用的安全壳结构形式为扁球面穹顶、平底板和立式圆筒形单层安全壳。对该种安全壳进行结构在役检查时可参考使用。对于其它形状安全壳也可参考使用。

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,仅所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。

GB 50152 混凝土结构试验方法标准

HAF 102(2004) 核动力厂设计安全规定

3 试验目的

满足HAF 102(2004)第6章的要求,通过试验检验安全壳在构造和强度方面承受设计基准事故的能力,验证在设计基准事故时安全壳能够保持结构的完整性。

4 试验依据的基本条件

4.1 试验与基本条件关系

安全壳结构整体性试验应与本章的基本条件相适应,并依据这些基本条件开展试验工作。

4.2 原型安全壳

若被测的安全壳结构,是新的设计或有新的改进,并且未经试验验证,则应定义为原型安全壳。其试验内容见6.1。

4.3 非原型安全壳

如果在原型安全壳的试验中,已经取得了应变、整体变形的测量值,并且对测量值和预计值做出了比较、评价,则把这种安全壳在另行建造时定义为非原型安全壳。其试验内容见6.2。

4.4 安全壳结构特征

安全壳结构特征包括安全壳的结构形式、混凝土强度等级及粗骨料最大粒径、混凝土和钢材的物理力学性能参数、预应力钢束的分布及其预应力水平。

4.5 安全壳主要参数

安全壳主要参数包括单堆名义功率、安全壳外形尺寸、安全壳设计压力、安全壳内设计基准工况下最高温度等。

4.6 工程建设进度计划

应随土建施工安装埋设测试仪表，依据工程建设进度计划开展试验工作。

5 试验压力

5.1 最高试验压力

安全壳最高试验压力为1.15倍设计压力。

5.2 压力分级

从大气压开始，向安全壳内充气施加压力，加压和减压过程分成接近相等的5级。

5.3 压力加减速率

压力的加减速率每小时不应大于最高试验压力的20%；每一级压力到达后，恒压时间不应小于1h。分级加压、减压曲线例子可参见附录A。

6 测试项目

6.1 原型安全壳

试验应至少包括下列内容：

- 安全壳整体变形测量；
- 混凝土应变测量；
- 灌油（蜡）钢束力测量；
- 灌浆钢束力测量；
- 温度测量；
- 混凝土裂缝观测；
- 安全壳外观质量检查（包括安全壳内部和外部）；
- 安全壳内试验压力测量。

根据工程要求，可以选择下列项目：

- 非预应力钢筋应力测量；
- 现场气象测量。

6.2 非原型安全壳

试验应至少包括下列内容：

- 安全壳整体变形测量；
- 混凝土应变测量（可在7.2.2中选择应变测点）；
- 温度测量；
- 混凝土裂缝观测；

- 安全壳外观质量检查；
- 安全壳内试验压力测量。

根据工程要求，可以选择下列项目：

- 灌油钢束力测量；
- 灌浆钢束力测量；
- 非预应力钢筋应力测量；
- 现场气象测量。

7 测点布置

7.1 安全壳整体变形测量

7.1.1 分类

整体变形分为安全壳水平方向直径的变化（径向变化）、安全壳高度变化和穹顶挠度。

其测点可以布置在壳内，也可以布置在壳外。

一般情况，宜用铅垂线法，把测点布置在壳外。当壳内生产工艺设备布置松散，壳内比较空旷，投产工期不紧时，可采用张线法，在壳内布置位移计。

7.1.2 铅垂线法

铅垂线法测量系统由铅垂线、上锚点、套管、保护箱、读数装置、重锤和阻尼器等构成，测量系统示意图参见附录B。

该系统用于径向（即安全壳直径变化）整体变形测量时，铅垂线应使用不锈钢丝，读数装置宜采用光电、光学等测读方法。

该系统用于安全壳高度变化（即环梁或筒体上部的高度变化）整体变形测量时，考虑到温度对铅垂线的影响，铅垂线应选用温度线膨胀系数小的丝材。读数装置采用机械、电感等竖向变形测量系统。

径向变形测量，沿安全壳筒壁圆周4个方位，避开设备闸门孔和扶壁柱，间距90°左右，设置铅垂线。在每一方位，应至少取3个标高（大致分别为筒壁高的1/4、1/2和3/4处附近）布置测点。其中，中间高度一层测点应接近理论计算所得之径向变形产生最大值位置。

高度变形测量，测点方位与径向变形测点位置接近，其标高设在环梁的下方或筒体的顶部，共4个测点。

在高度变形测量的4个方位，以环梁上表面为相对固定的参考点，观测穹顶中央、穹顶中央至环梁水平距离的中点附近（1个方位）相对环梁的挠度。参见附录C。

7.1.3 张线法

张线法测量系统由位移计、张线、重锤和固定支架组成。

测量安全壳径向变化时，在壳内大致间隔90°的四个方位、按五个标高布置测点。其中，最低一层，布置在筒壁高度的1/5处；最高一层布置在筒壁与环梁的交接处；剩余的中间三层，宜沿筒壁高度均匀分布。另外，在设备闸门孔四周应适当增设壳壁径向变化的测点。

测量安全壳高度变化时，在筒体顶部4个方位上布置筒体顶部相对于底板的高度变化的测点，在穹顶顶点（中央）和顶点到起拱线之间（仅1个方位），设置穹顶相对于底板的高度变化测点。

考虑到温度对张线的影响，上述张线应选用温度线膨胀系数小的丝材。

7.2 混凝土应变测量

7.2.1 测点的组成

测点布置在安全壳壁厚的内、外排普通钢筋处,对某些重要测量部位,还可以增加壁厚中部测点。每个测点,一般均按主应力方向已知的平面应力状态布置,由环向的和竖向的两个应变计组成。

7.2.2 测点分布

原型安全壳应在下列部位设置应变测点:

- 筒壁与基础底板交接处(如加腋可取2个方位,无加腋可取4个方位);
- 筒壁高度的中间部位(4个方位);
- 穹顶的顶点部位;
- 设备闸门孔的一侧及其正上方的变断面处。

7.2.3 选择部位

根据受力情况,决定下列部位是否设置应变测点:

- 基础底板;
- 筒壁与扶壁柱交接处;
- 筒壁与环梁交接处;
- 穹顶与环梁交接处。

7.3 灌油钢束力测量

在竖向钢束中,选择直的四根钢束作为灌油钢束,其中二根钢束的上下端各安装一个测力传感器。另外二根钢束只在被动端安装测力传感器。

对于环向钢束,选取二根标准钢束作为灌油钢束,在每根钢束的两端均布置测力传感器。

对于穹顶钢束,选取不同方向的二根钢束作为灌油钢束,在每根钢束的两端均布置测力传感器。

有的安全壳以蜡替代油,成为灌蜡钢束,其钢束力测量方案应与灌油束完全一致。

7.4 灌浆钢束力测量

7.4.1 测点分布

在灌浆钢束的下列部位布置应力或应变测点:

- 沿筒壁高度,选取六根环向钢束,在每根钢束上布置四个测点;
- 选取三根竖向钢束,在每根钢束上布置三个测点;
- 在穹顶的每个方位选取一根钢束,并在其上布置二个测点。

7.4.2 测量方案

灌浆钢束力测量传感器应具有优良的长期稳定性和在传感器安装、预应力张拉过程不易损坏的特点。应优先采用光纤测量技术,直接测量钢束的应力应变。也可在灌浆钢束周围混凝土内,安装混凝土应变传感器,间接测量钢束力值。

7.5 温度测量

温度测量数据用于测试设备的温度特性修正和安全壳温度变形及温度应力分析。

温度测点应照7.2.2测点在壳壁内布置。在穹顶上表面、筒体上部的外表面,适当增设温度测点。

如果采用张线法测量安全壳整体变形,还应考虑整体变形测量系统温度特性修正的需要,在壳内布置温度测点。

7.6 混凝土裂缝观测

7.6.1 观测部位

在下列部位，应设置裂缝观测区：

- 筒壁的中间高度处；
- 设备闸门孔周围；
- 扶壁柱与筒壁交接处；
- 穹顶中央；
- 穹顶与环梁交接处；
- 有外观质量缺陷的表面。

7.6.2 观测区

在上述部位里，除穹顶中央设1个观测区外各设2个观测区，每个观测区的检查范围不应小于 4m^2 。

7.7 安全壳外观质量检查

本项目是对安全壳外观的全面检查。检查范围包括裂缝、蜂窝、麻面、孔洞、表面夹杂物、表面玷污及缺棱掉角等，对于混凝土受拉区外表面、钢衬里、截面有较大变化处、孔口附近等部位，要作为重点对象进行检查。对于钢束锚具暴露部分或其上面的永久性保护部分（包括混凝土、水泥浆或钢帽）都应进行外观检查，并做好记录。

7.8 壳内试验压力测量

壳内压力测点宜靠近试验用的电气贯穿件设置，除测量压力的工作传感器外，还应在其附近设置备用传感器，同工作传感器一并从电气贯穿件引出壳外。

7.9 非预应力钢筋应力测量

7.9.1 测量原则

如经计算结构整体性试验进行期间混凝土不会开裂，可认为钢筋应变数值与混凝土应变相等。若经计算混凝土有裂缝出现，则应设置钢筋应力测点。

7.9.2 测点设置

钢筋应力测点应按照7.2.2选择布置。

7.10 现场气象测量

现场气象测量装置宜放在安全壳穹顶上部，测量试验期间风向、风速、温度、相对湿度、阳光直射、阳光散射的数据，为安全壳的热传导分析、温度影响分析等提供所需的重要数据。

8 试验技术要求

8.1 总体要求

8.1.1 测试设备检验

结构整体性试验测试设备应具有很高的可靠性和长期稳定性，应经过实践证明，性能符合要求。

8.1.2 精度

测试设备的精度应符合8.2的要求。

8.1.3 修正处理

试验数据采集处理系统应具备补偿、修正处理功能,能够实现多参数实时修正、处理,实时绘出曲线图表。对于同安全壳结构力学性能有关的修正,如安全壳的温度应力、温度变形等,可在试验结束后另行处理。

8.2 各测试项目的技术要求

8.2.1 安全壳整体变形测量

整体变形测量系统的综合误差不应大于最大变形测点总变形值的 $\pm 5\%$ 或绝对误差不应大于0.25mm,取其大者。

8.2.2 混凝土应变测量

综合误差不应大于最大应变测点总应变的 $\pm 5\%$ 或绝对误差不应大于20微应变($\mu\epsilon$),取其大者。对于预埋在混凝土内部或安装在混凝土表面的应变计基距,要大于或等于混凝土粗骨料最大粒径的5倍。

应变计安装过程中,应监控其输出数值,使其有较小的零点读数,应变计的几种安装定位方法参见附录D。

8.2.3 灌油钢束力测量

被测钢束预应力张拉完毕后,及时灌油。

钢束力测量宜用穿心式测力传感器,其相对误差不应大于被测张拉值的 $\pm 1\%$ 。

8.2.4 灌浆钢束力测量

采用光纤等直接测量钢束力方案时,综合误差不应大于最大应变的 $\pm 5\%$ 或应变绝对误差不应大于 $10\mu\epsilon$,应力绝对误差不应大于2MPa,取其大者。

如采用测量灌浆钢束周围混凝土应变,则测量精度要求同8.2.2。

灌浆钢束力测量过程,要监测传感器的零点漂移,并做必要的修正处理。

8.2.5 温度测量

温度测量绝对误差不应大于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

8.2.6 混凝土裂缝观测

每个观测区范围内应将表面刷白,并分格画线。在加压试验前、试验中、试验后,对混凝土外表面状态进行检查,绘出宽度超过0.25mm和长度超过150mm的裂缝。

观测裂缝宽度的仪表,其最小分度值不宜大于0.05mm。

8.2.7 安全壳外观质量检查

在加压试验前,检查壳内、壳外各有关部位的原始状况,做好记录。试验压力到达设计压力的1.15倍时,检查壳外部位,是否有异常现象。试验结束后,要对照试验前的检查结果检查各部位的变形恢复情况。

8.2.8 壳内试验压力测量

压力传感器的相对误差不应大于试验压力的 $\pm 1\%$ 。压力传感器的量程，宜为1.5~3倍的最高试验压力。

8.2.9 非预应力钢筋应力测量

非预应力钢筋应力测量可采用钢筋计，利用焊接方法串接到结构钢筋中，其误差应小于8.2.2的要求。安装过程中，试验人员要与焊接工人密切配合，控制焊接温度。

8.2.10 现场气象测量

可参考自动气象站的技术要求。

9 试验验收条件及复试

9.1 验收条件

如符合下列最低限度条件，则认为安全壳满足结构整体性试验要求：

- 由裂缝宽度、混凝土应变和整体变形数据分析确定非预应力钢筋不会出现屈服；
- 经检查，混凝土结构和钢衬里无永久性损伤的可见痕迹。若遇有钢衬里与混凝土剥离、分层等，而由应变或整体变形测量不能确认的混凝土局部损坏，需由设计人员做出解释、确定并为业主所接受；
- 在减压结束或减压后24h，在最大实测的径向变化和高度变化整体变形处的剩余变形，不超过最大试验压力下的测量值或预计值的20%（取其较大者）加测量允许偏差再加0.25mm之和；
- 最大试验压力下，在预计最大径向变化和高度变化整体变形处，测量值不超过预计值的130%加测量允许偏差。对于同一标高的几个径向变化整体变形测点，可取平均值计算。如果在减压后24h内剩余变形不大于10%，则认为这项要求已经达到。

9.2 复试

如测量结果表明不符合9.1中c)和d)的要求，则要求设计人员对涉及徐变、温度变化的可能影响和设计预计值的准确性作进一步研究；要求试验承担单位对试验数据的精度、可靠性作进一步论证。

如这种研究和论证仍然表明不能满足9.1中c)和d)的要求，则应采取补救性措施或进行复试。

如果第一次试验后，安全壳结构发生较大的结构改变或明显的损伤，需要修补，则在其后要重新进行试验，并在进行较大结构修补的部位增设附加的仪表，以测定结构修补后是否提供了适当的结构承载力。

10 试验承担单位的资格要求

10.1 技术与经验

试验承担单位应具有承担安全壳结构整体性试验或类似的大型建（构）筑物结构试验的工作经历。

10.2 法律地位和组织管理

试验承担单位应具有明确的法律地位和组织形式；应有严格的组织管理和相应的质量保证体系。能确保判断的独立性、工作的完整性和测试结果的公正性。

10.3 资质审查

试验承担单位应通过国家有关主管部门的计量认证和国家实验室认可。其认可项目和技术能力符合安全壳结构整体性试验要求。

10.4 对参试人员的要求

参加试验的人员应经过培训且考核合格，并有相关专业的教育经历，对于在加压阶段进入安全壳的人员应有相应的健康合格证。

11 试验前的准备工作

11.1 安全壳试验条件

安全壳内的结构设施、设备、系统应进行必要的防护处置，以免试验时出现损坏。

11.2 技术文件

试验前应制订《实施方案大纲》、《试验实施细则》、《现场作业手册》等系列文件。《实施方案大纲》规定试验的要求、方法、步骤及组织管理。按质量保证要求，编制《质量计划》，并说明试验前提条件。文件需业主进行审查、确认。

《试验实施细则》侧重于各测试项目的具体实施，是《实施方案大纲》的执行细则。《现场作业手册》以现场作业为重点，规定设备安装、检验、调试、岗位责任分工等项目的具体要求和作业方法，为现场操作的主要依据文件。

11.3 资料

收集安全壳设计资料、设计图纸和计算书，原材料的物理力学参数，施工的数据资料以及测试仪表装置读数的预计值。

11.4 设备校验

对测试元件、传感器的主要技术指标，逐台进行复查标定，核对出厂数据的可靠性。按照结构整体性试验的特殊要求，有些元件、传感器还需补充测定一些技术参数。对于工作在安全壳内的仪表，需做试验压力作用下的工作性能试验，并在必要时，给出修正、补偿参数。

11.5 仪表的安装

现场仪表安装严格遵守《现场作业手册》规定，并做好安装记录。

11.6 适应性的检查

跟踪安全壳施工进度，定期测读已安装的仪表，检查其适应性。在预应力张拉期间，进行系统的全面的观测读数。

11.7 仪表的防护

对于在安全壳外安装的仪表，应设有防风、防雨、防晒、防雷击等保护措施。

12 试验的实施步骤

12.1 现场校核

在临近现场加压试验之前,利用参考标准对数据采集处理系统进行现场校核,确认测试仪表整体系统的完好性。

12.2 环境条件

现场加压试验宜在 $20^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 气温下进行,遇有6级以上大风或高温烈日暴晒、暴雨等,则应改变试验开始的时间。试验准备期间,如果预计气温条件可能超出 $20^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 范围,则应按可能的气温条件,事先标定测量仪表的温度特性,并作可靠的温度影响的补偿、修正,见GB 50152。

12.3 预试验

在加压试验开始之前的几天内(最少为24h),开展预试验,按一定间隔时间,采集全部测点数据,再次确认仪器仪表的稳定性和零点漂移情况,同时也可再次检查仪器仪表对气候环境的适应性和数据采集、修正、处理的功能。

12.4 采集制度

正式加压试验开始,在各级压力到达、恒压后1h、加压或减压开始前,各进行一次数据采集,并把恒压后1h的数据,作为本压力级别的代表性数值,作为绘制曲线图表、分析评定的依据。当恒压时间超过2h以及加压减压速率减慢,在加、减压过程中,宜适当增加测读采集次数。

12.5 意外降压

遇有不可预见的情况,使加压过程中的试验压力下降大于0.02MPa,则应把压力进一步降低到前一个压力级别,并再次测取这个压力级别的读值。如与减压前本级别的读值差异较大,需由设计单位做出分析和评价,以确定是否继续加压。

12.6 中间数据判断

根据安全壳计算整体变形的相关数据,选定整体变形数值较大的测点,作为监视点。在每个压力级别的整体变形数据获得后,立即与设计计算值比较,判断试验是否可以继续进行。

12.7 试验结束时仪表性能确认

结构整体性试验最后一次测读是在试验压力卸除后进行。数据采集完毕,应对肉眼可见的测点仪表的完好性进行检查,对比试验前的安装状态有无异常。对典型测点,还需重复12.1的检查,再次确认测试仪表工作正常。

12.8 试验数据判定

试验结束后,应对试验数据作初步判定,确认试验工作符合要求。

13 试验报告

13.1 初步报告

在现场试验结束后,应按合同或委托书的要求提交含有主要测点初步数据和基本结论的初步报告,为安排试验后核电厂的工作计划提供依据。

13.2 最终报告

在现场试验结束后，应全面整理、分析试验数据，提出最终报告。

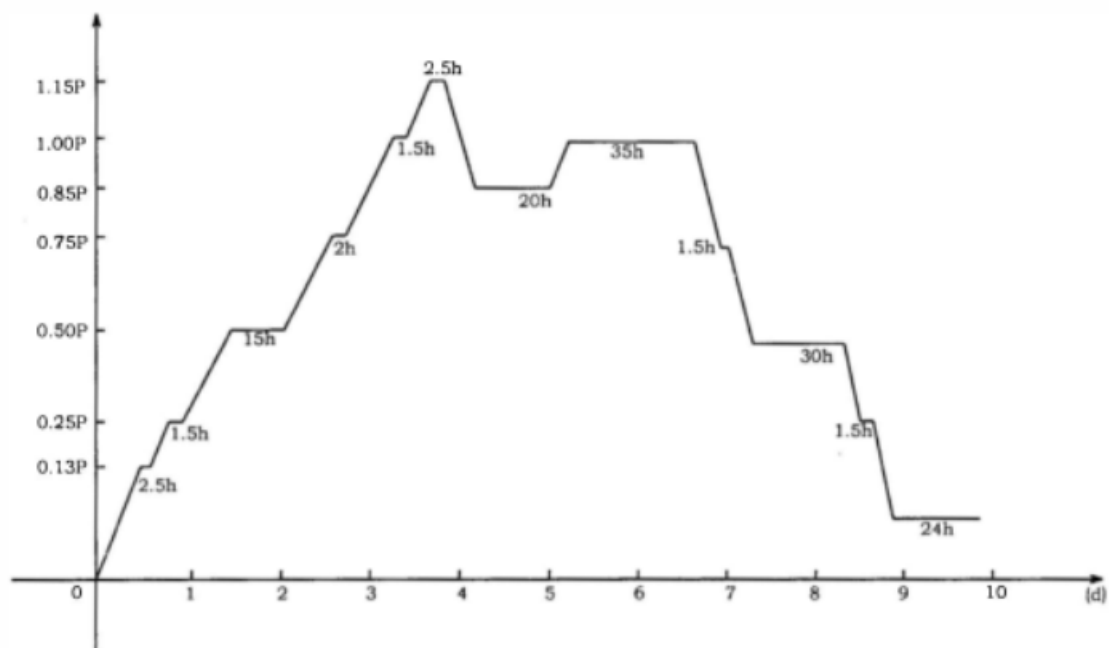
13.3 最终报告内容

最终报告的内容至少应包括：

- 试验前的结构状况、试验方法、试验过程、仪表和测量装置的描述；
- 整体变形、应变和裂缝宽度的试验测量值及其与设计计算值的比较；
- 对各种误差的处理和评价；
- 试验结论。



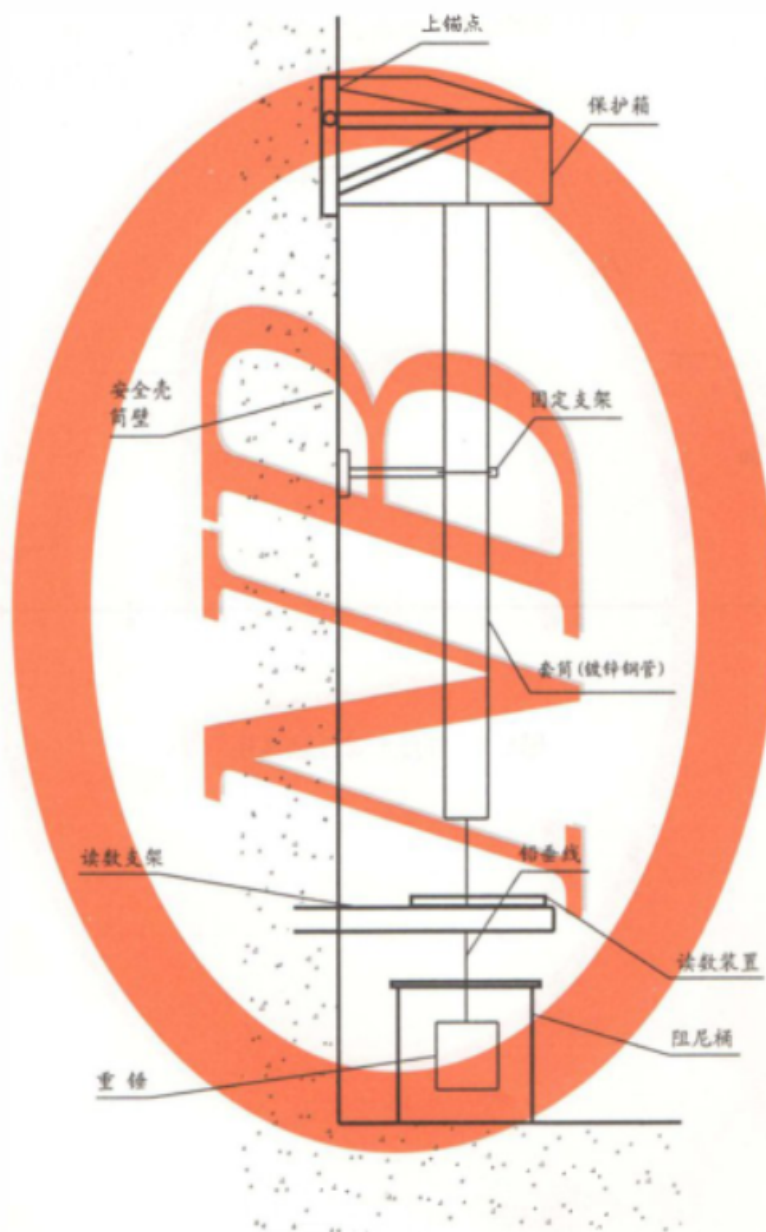
附录 A
(资料性附录)
加压、减压曲线图



图A.1 加压、减压曲线图

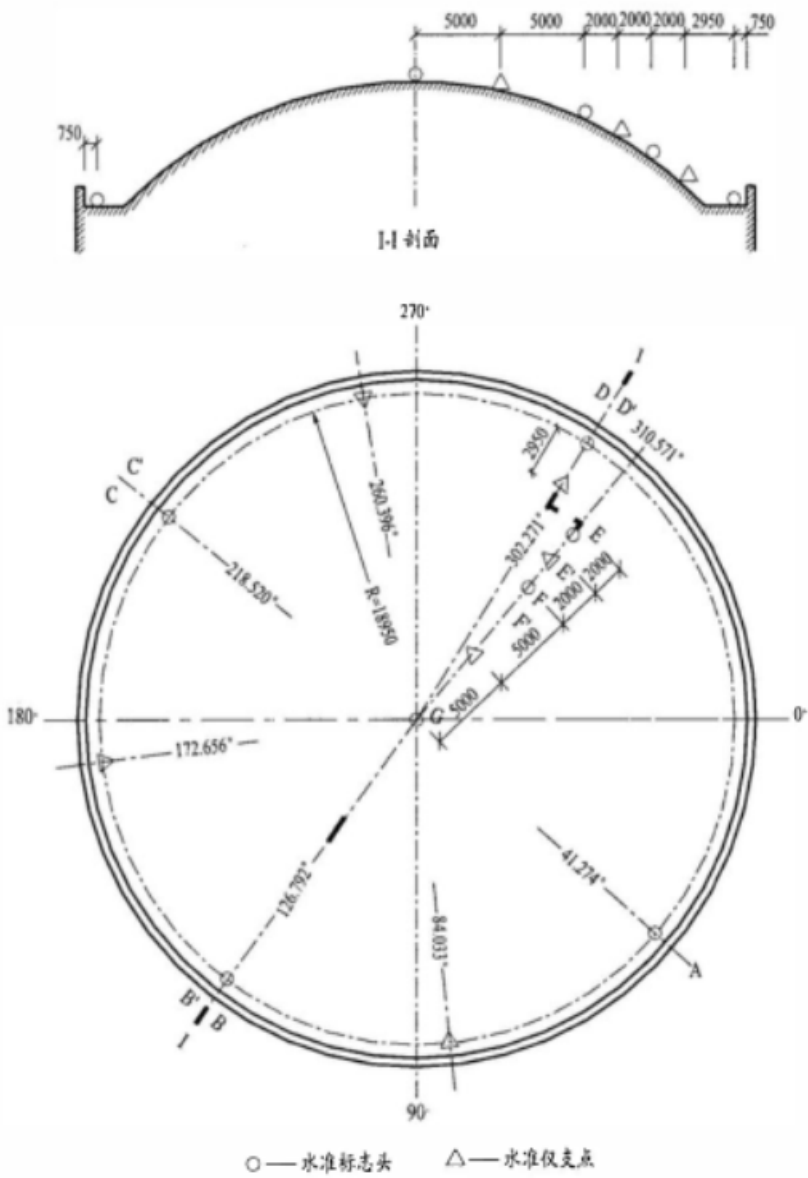
附录 B
(资料性附录)

利用铅垂线法测量安全壳整体变形示意图



图B.1 利用铅垂线测量安全壳整体变形示意图

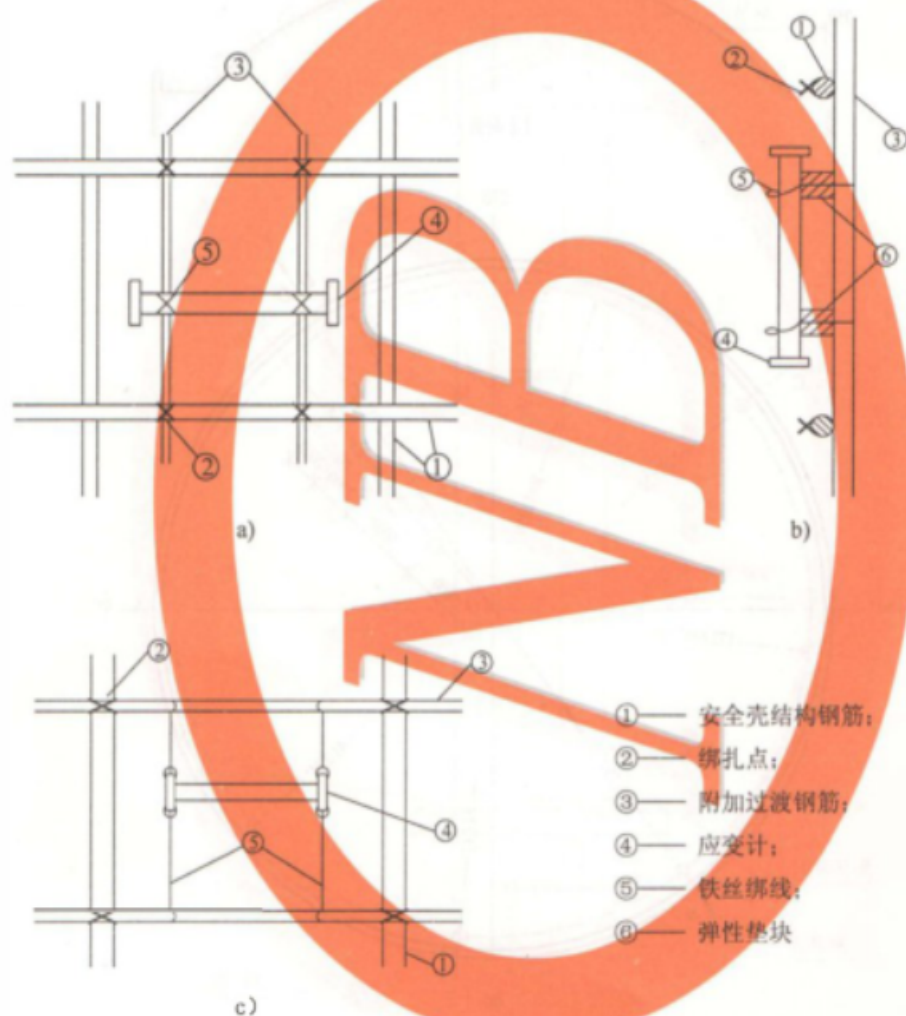
附录 C
(资料性附录)
利用水准仪测量穹顶挠度



图C.1 水准仪测点布置

附录 D
(资料性附录)
几种埋入式混凝土应变计定位方法

埋入式应变计定位方法示意图参见图D.1, 其中图D.1a) 型式适用于多种埋入式应变计(振弦式应变计除外), 图D.1 b) 型式适用于直径较小的各种埋入式应变计, 图D.1c) 型式适用于各种埋入式应变计。



图D.1 埋入式应变计定位方法示意图

www.bzxz.net

免费标准下载网