

ICS 编号

CCS 编号

团 体 标 准

T/CHES XXX—20XX

水利水电工程钢岔管水压试验技术规程

Technical specification for hydrostatic test of steel branch pipe in water
conservancy and hydropower engineering

20XX-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国水利学会 发 布

目 次

前 言	1
1 总 则	1
2 术语和符号	3
3 仪器设备及要求	3
3.1 一般规定	3
3.2 加压设备	3
3.3 水量监测设备	4
3.4 变形监测设备	4
3.5 温度监测设备	4
3.6 应力测试设备	4
3.7 残余应力测试设备	5
3.8 声发射测试设备	5
4 测点布置	5
4.1 一般规定	5
4.2 水压测点	5
4.3 变形测点	5
4.4 应力测点	5
4.5 温度测点	6
4.6 残余应力测点	6
4.7 声发射测点	6
5 试验方法	6
5.1 一般规定	6
5.2 预试验	6
5.3 主试验	6
6 资料整理及报告编制	7
6.1 试验资料整理	7
6.2 报告编制	7
附录 A	9
本标准用词说明	II
引用标准名录	3

前 言

本文件按照《工程建设标准编写规定》（建标〔2008〕182号）的规定起草。

本文件共分为6章和1个附录，主要技术内容包括总则、术语和符号、仪器设备及要求、测点布置、试验方法、资料整理及报告编制等。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条16号，邮编100053），以便今后修订时参考。

本文件主编单位：长江水利委员会长江科学院
水利部水工金属结构检验测试中心

本文件参编单位：水利部产品质量标准研究所
长江勘测规划设计研究有限公司
中国水利水电第八工程局有限公司机电设备制造岳阳分公司

本文件主要起草人：

本文件主要审查人：

1 总 则

- 1.0.1 为规范水利水电工程钢岔管水压试验，保证试验质量，做到安全、经济合理、技术先进，制定本文件。
- 1.0.2 本文件适用于水利水电工程 800MPa 级及以下钢岔管的水压试验。
- 1.0.3 水压试验前应收集钢岔管的设计图纸及技术说明相关资料，试验应在钢岔管制造完成和几何尺寸及焊缝质量检验合格后进行。
- 1.0.4 水压试验前应编制试验方案。包括（但不限于）：项目概况、试验目的和内容、技术路线、试验方法、安全与技术保障措施、应急预案等。
- 1.0.5 水压试验前宜检查并排除因结构摩擦、敲击、移动、电磁干扰及机械振动等产生的干扰源。
- 1.0.6 水压试验的环境温度及水温应在 5℃ 以上。
- 1.0.7 水压试验前及试验后应采用无损检测方法进行焊缝残余应力测试，水压试验过程中宜进行水压力、进出水量、变形、应力、温度、声发射监测。
- 1.0.8 加压设备及监测设备宜集中布置在安全距离以外。
- 1.0.9 出线装置应设置在支管闷头上，且密封良好。
- 1.0.10 水压试验前，应排除钢岔管内部的空气。
- 1.0.11 试验工作除应执行本文件外，尚应符合国家现行有关标准的规定。
- 1.0.12 本文件主要引用下列标准
- GB/T 150.4 压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收
 - GB/T 13992 金属粘贴式电阻应变计
 - GB/T 18182 金属压力容器声发射检测及结果评定方法
 - GB/T 32073 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法
 - GB/T 33210 无损检测 残余应力的电磁检测方法
 - GB 50766 水利工程压力钢管制作安装及验收规范
 - GB/T 33213 无损检测 基于光纤传感技术的应力监测方法
 - GB 50026 工程测量规范
 - SL 197 水利水电工程测量规范
 - SL/T 281 水利水电工程压力钢管设计规范
 - SL 432 水利工程压力钢管制造安装及验收规范
 - SL 751 水工金属结构声发射检测技术规程
 - SL 547 水工金属结构残余应力测试方法-X 射线衍射法
 - DL/T 5017 水利水电工程压力钢管制造安装及验收规范
 - NB/T 35056 水电站压力钢管设计规范
 - NB/T 35110 水电站地下埋藏式月牙肋钢岔管设计规范
 - NB/T 47013.9 承压设备无损检测 声发射检测

2 术语和符号

前述引用文件中界定的以及下列术语和符号适用于本文件。

2.0.1 压力循环 pressure cycle

水压力从初值开始逐级递增至最大值后再逐级递减至初值的过程。

2.0.2 循环方法 cyclic method

压力逐级加卸的路径。

2.0.3 循环次数 cycle index

压力逐级加卸的次数。

2.0.4 压力级差 pressure gradient

将钢岔管水压试验的最大压力分为若干级进行加压或卸压时，前后级之间的压力差。

2.0.5 加卸压时间 time of loading or unloading pressure

按一定的速率连续给钢岔管加压或卸压所使用的时间。

2.0.6 加卸压速率 rate of loading or unloading pressure

进行加压或卸压时，钢岔管内水压力增加或降低的速度。

2.0.7 稳压时间 stabilized pressure time

在某压力级下，保持压力不变所持续的时间。

2.0.8 进出水量 water inflow or outflow volume

某一压力级下，钢岔管注水或泄水的总量。

2.0.9 内水温度 internal water temperature

钢岔管内部水的温度。

2.0.10 外水温度 external water temperature

注入钢岔管前的水的温度。

2.0.11 出线装置 outlet device

用于引出钢岔管内部测线的具有密封耐压性能的装置。

2.0.12 HD 值 HD value

钢岔管设计内水压力与钢岔管主管直径的乘积，表征钢岔管的规模。

3 仪器设备及要求

3.1 一般规定

3.1.1 水压试验所用的仪器设备精度应满足试验要求，并经地（市）级及以上计量检定机构检定或校准合格。

3.1.2 试验所用测线应具有适应最大试验水压力的防水、耐压性能。

3.1.3 测试系统应具有接地装置。

3.2 加压设备

3.2.1 宜采用伺服控制加压或电动加压设备。

3.2.2 加压设备的额定工作压力应不小于最大试验压力的 1.5 倍。

3.2.3 加压设备的额定输出流量应适应加压速率的要求。

3.2.4 压力表和压力传感器量程宜为最大试验压力的（1.5~2）倍，压力表等级不低于 0.5 级，压力传感器精度应不低于 $\pm 0.5\%FS$ 。

3.3 水量监测设备

3.3.1 水量监测设备宜采用电子台秤、水箱等监测设备。

3.3.2 水量监测设备的精度宜不低于试验总水量的 5%。

3.3.3 水箱应包括主水箱和水量读取装置，水箱宜为标准几何形状。

3.3.4 水箱宜设置在加压设备附近，并安装水平。

3.4 变形监测设备

3.4.1 变形监测设备可采用全站仪、数字工业摄影、激光跟踪仪等工业测量系统和回弹式传感器等位移监测系统。

3.4.2 全站仪测量系统

1 包括主机、气象监测附件、测量标记及系统软件。

2 全站仪的测角精度应不低于 $\pm 0.5''$ 。

3.4.3 数字工业摄影测量系统

1 包括高分辨率专业数字相机、基准尺、定向靶、编码标志、反光标志及系统软件。

2 测量精度应优于 $\pm 0.5mm$ （20m 内）。

3.4.4 激光跟踪仪测量系统

1 包括主机、控制器、球棱镜、靶座及系统软件。

2 测量精度应优于 $\pm 0.5mm$ （20m 内）。

3.4.5 回弹式传感器位移监测系统

1 包括采集仪、传感器、测线、支架及系统软件。

2 位移传感器量程宜取设计最大值的（1.5~2）倍，精度应优于 $\pm 0.25\%FS$ ，分辨率应优于 $\pm 0.01mm$ ；

3 采集仪采样频率应不小于 1 次/min，能实时显示各通道当前值。

3.5 温度监测设备

3.5.1 温度传感器应不少于 3 只，量程宜在 $-10^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$ 范围，精度应满足 A 级要求。

3.5.2 温度数据采集仪采样速率应不小于 1 次/min，应能实时显示各通道当前值。

3.6 应力监测设备

3.6.1 电阻应变监测系统

1 电阻应变监测系统包括：应变片、应变采集仪、计算机及软件。

2 电阻应变片等级宜为 A 级，电阻值误差不大于 $\pm 0.1\Omega$ ，灵敏度系数宜为 $2\Omega \pm 1\%$ ，钢岔管内壁宜采用防水电阻应变片。

3 应变采集仪应具备自动/手动采集功能，准确度级别宜不低于 0.2 级，采集频率不小于 1 次/min。

3.6.2 光纤应变监测系统

1 光纤应变监测系统包括传感器、解调仪、传输光缆、二次仪表和计算机等部分。根据钢岔管特点，可选择点式或连续式光纤，光纤应变监测系统应符合 GB/T 33213 的规定。

2 光纤应变监测系统空间分辨率应优于 100mm，应变测量精度应优于 $10\mu\epsilon$ ，应变分辨率小于 $2\mu\epsilon$ ，温度测量精度小于 $0.5^{\circ}C$ ，温度分辨率小于 $0.1^{\circ}C$ 。

3.7 残余应力测试设备

- 3.7.1 残余应力测试设备宜选用无损法测试设备。
- 3.7.2 X 射线衍射法测试设备应符合 SL 547 的规定。
- 3.7.3 超声临界折射纵波法测试设备应符合 GB/T 32073 的规定。
- 3.7.4 电磁法测试设备应符合 GB/T 33210 的规定。

3.8 声发射监测设备

- 3.8.1 声发射监测设备应包括系统主机、声发射传感器、前置放大器、电缆线、采集和分析软件等。
- 3.8.2 声发射监测系统应能实时显示和分析所采集的通道号、幅值、上升时间、能量、持续时间、振铃计数等信号数据，并具有相关的滤波、一维和二维时差定位功能。
- 3.8.3 声发射监测设备还应符合 SL 751 的规定。

4 测点布置

4.1 一般规定

- 4.1.1 当两个钢岔管对接进行水压试验时，宜在其中一个钢岔管布置测点，另一钢岔管布置一定数量的比照测点。
- 4.1.2 所有测点及测线应进行编号。
- 4.1.3 变形测点、应力测点的位置宜根据钢岔管设计计算书确定。

4.2 水压测点

- 4.2.1 水压监测宜采用自动采集设备，压力传感器宜安装在钢岔管排气阀或溢流阀附近。
- 4.2.2 压力表宜安装在水泵的出水端，不得安装在水泵和进水管上。

4.3 变形测点

- 4.3.1 变形测点宜布置在钢岔管主管、连接管、主/支锥管、腰梁连接处或折角点等主要受力载荷区和主/支管中部等易变形区。
- 4.3.2 变形测点宜以断面的形式布置，每个断面中测点数量应不少于 2 个，每个断面中测点宜沿断面中心对称布置。断面数量应根据结构特征确定，单岔管测量断面数量宜不少于 3 个，双岔管变形断面宜不少于 5 个。
- 4.3.3 与传感器连接的支架应具有足够的刚度和稳定性。

4.4 应力测点

- 4.4.1 应力监测的重点部位为钝角区、肋板旁管壳区和月牙肋板处，闷头和连接锥管段亦应布置部分测点，在应力梯度较大的部位适当增加测点。
- 4.4.2 测点宜布置在钢岔管上部单侧，另一侧布置适量比照测点，所有测点宜内、外壁对应布置。
- 4.4.3 焊缝旁应力测点与焊缝边缘距离宜为（10-30）mm，膜应力测点与焊缝边缘间距应不小于 200mm。
- 4.4.4 应在应力复杂区进行三向应变监测。
- 4.4.5 采用连续式光纤监测时，光纤应沿月牙肋组合焊缝、主支锥相贯线环缝、主锥环缝及主支锥管壳环向布置，其它部位适当布置。
- 4.4.6 电阻应变片测点部位应打磨露出金属光泽，光纤测点部位处理应符合 GB/T 33213 的规定。

4.5 温度测点

- 4.5.1 应布置内水温度测点、外水温度测点、环境温度测点各 1 个。
- 4.5.2 内水温度传感器测线应通过出线装置引出，外水温度传感器应放在水箱内，环境温度传感器宜设置在钢岔管附近。
- 4.5.3 传感器应与管壳、盛水器具壁保持一定距离。

4.6 残余应力测点

- 4.6.1 在钢岔管主支锥相贯线焊缝顶点或底点附近、主支锥相贯线焊缝腰部、主锥环缝、主锥环缝与纵缝交叉点等代表性部位布置测区，测区数量不应少于 5 个，每个测区应至少布置 1 条测线。
- 4.6.2 测线应与焊缝垂直，每条测线应布置不少于 5 个测点，测点应涵盖热影响区、熔合线及焊缝中心，对于 T 形接头，应适当增加测点。

4.7 声发射测点

- 4.7.1 应在月牙肋组合焊缝、主支锥相贯线焊缝、主锥环缝旁布置声发射测点。
- 4.7.2 测点数量应根据声发射监测系统调试结果确定。
- 4.7.3 测点宜布置在距焊缝边缘 200mm 附近。
- 4.7.4 声发射测点布置及其他要求按 SL 751 执行。

5 试验方法

5.1 一般规定

- 5.1.1 水压试验应包括一次预试验和两次主试验。预试验主要是检查钢岔管及试验管路的密封情况及监测设备的运行情况。主试验主要验证钢岔管结构的可靠性、钝化缺陷及消应等。
- 5.1.2 试验前后宜采用 X 射线衍射法进行残余应力测试。
- 5.1.3 试验过程中钢岔管出现异常时，应先将钢岔管内压力卸至零压力，排除异常后重新开始试验。
- 5.1.4 试验过程中应实时分析关键部位测试数据，预判变化趋势。
- 5.1.5 应采取措施降低环境温度变化对监测数据的影响。
- 5.1.6 水压试验完成后，应打开排气阀、溢流控制阀排水卸压。
- 5.1.7 水压试验过程中应按附录 A 记录相关信息。

5.2 预试验

- 5.2.1 预试验最大压力宜为主试验最大压力的 $1/3 \sim 1/2$ ，宜分级加卸压。
- 5.2.2 加卸压速率应不大于 0.05MPa/min，但不宜小于 0.02MPa/min。
- 5.2.3 每级稳压时间宜不小于 10min，最大压力下稳压时间宜不小于 30min。
- 5.2.4 应对水压力、进出水量、应力、变形、温度及声发射进行实时监测。
- 5.2.5 预试验期间应对岔管焊缝、试验管路等进行密封检查，发现异常时暂停试验，排除后再次试验。
- 5.2.6 预试验结束后，应对监测数据进行分析，发现监测系统有异常时应处理。

5.3 主试验

- 5.3.1 主试验宜在预试验结束 2h 后进行。
- 5.3.2 主试验应包括两次完整的压力循环，单次压力循环宜采用大循环法，两次压力循环间隔宜

不少于 4h。

5.3.3 主试验加压及稳定标准应符合下列规定：

- 1 主试验最大压力应为钢岔管最高内水压力设计值的 1.25 倍。
- 2 主试验应分级加卸压，压力级差宜取 0.5MPa，低压和高压阶段压力级差可根据实际情况适当增减，对于关键压力点分级时应包含该压力级。
- 3 加卸压速率应不大于 0.05MPa/min，但宜不小于 0.02MPa/min。
- 4 每级加压后稳压时间宜不小于 30min，最高压力下稳压时间宜不小于 60min，每级卸压后稳压时间宜不小于 20min。

5.3.4 变形监测应符合下列规定：

- 1 采用传感器测量系统时，传感器与采集仪连接后，宜空采不少于 30min 后开始试验。传感器的初始值应调至合理位置。
- 2 采用工业测量系统时，宜建立变形测量坐标系，通过四周稳定的控制点保证坐标系统一，测量管体表面测点的变形量。

5.3.5 应力监测应符合下列规定：

- 1 传感器与采集仪连接后，宜空采不少于 30min 后开始试验。
- 2 试验过程中，应实时观察数据变化规律，当应变速率明显增大或应变接近预警值时，综合分析后，决定下一步试验程序。

5.3.6 声发射监测应符合下列规定：

- 1 声发射监测应符合 SL 751 的规定。
- 2 对声发射监测系统进行初步工作参数设置后，应利用模拟源进行衰减测量、背景噪声测量、灵敏度测量和定位校准。
- 3 应在加压和稳压过程中进行监测。
- 4 宜根据钢岔管几何特征选择一维时差或二维时差等定位方式。
- 5 应观察声发射撞击数和定位源随压力或时间的变化趋势，发现声发射信号异常，在未查明原因时，应停止加压。

6 资料整理及报告编制

6.1 试验资料整理

- 6.1.1 试验资料应包括试验过程记录文件、影像文件、电子数据等。
- 6.1.2 应形成必要的图表与说明，对异常数据应分析原因并合理处理。
- 6.1.3 资料整理宜包含以下内容：
 - 1 水压力、加卸压速率、稳压时间、分级与级差等统计分析。
 - 2 水压力、水量、应力、变形、温度与时间关系及分析。
 - 3 水量、应力、变形与水压力关系及分析。
 - 4 断面径向和轴向变形量。
 - 5 加压和稳压过程中声发射信号幅值与时间经历关系、撞击数与通道分布图、撞击累计数与时间经历关系、撞击数与振幅关联图、事件定位图等。
 - 6 分析各测区水压试验前后残余应力分布规律和消应效果。

6.2 报告编制

- 6.2.1 水压试验报告应包括前言、项目概况、试验内容及方法、试验成果及分析、结论与建议、

附图附表等内容。

6.2.2 前言内容应包括项目来源、试验目的、试验过程等。

6.2.3 项目概况应包含钢岔管布置形式、几何参数、材料牌号等。

6.2.4 试验内容及方法应包括试验项目布置、工作量、试验依据、试验设备、试验安装、试验程序等。

6.2.5 试验成果及分析内容应包括测试项目的试验数据分析、试验成果评价等。

6.2.6 附图附表内容宜包括测点布置图、试验成果图表、现场照片等。

附录 A

附录 A.0.1：钢岔管水压试验过程记录表

第 页总 页

工程名称：钢岔管编号：

序号	过程名称 (加压、稳压、卸压)	试验开始时间 (h: min)	水压值 (MPa)	试验结束时间 (h: min)	稳压时间 (h: min)	备注

测试人：记录人：校核人：日期：

[illegible]

10

仪器编号:

[illegible]

日期:

附录 A.0.4: 钢岔管水压试验变形记录表 (传感器法)

第 页总 页

工程名称:

钢岔管编号:

仪器名称:

仪器编号:

[illegible]

测试人:

记录人:

校核人：

日期:

附录 A.0.5： 钢岔管水压试验变形记录表 （工业测量系统法）

工程名称： 钢岔管编号： 仪器名称： 仪器编号：

断面名称： 断面位置： 断面测点数量：

序号	水压	时间	测点名及测点位置			测点名及测点位置			测点名及测点位置			测点名及测点位置			断面测 点径向 长度	断面测 点轴向 距离
			测点坐标/mm			测点坐标/mm			测点坐标/mm			测点坐标/mm				
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z		
	0															
	0.5															
	1.0															
备注：																
(1) 指明测点坐标维度 XYZ 的方向；																
(2) 表明计算径向变形所依据的测点；																
(3) 表明计算轴向距离的测点及其基准等信息。																

测试人： 记录人： 校核人： 日期：

附录 A.0.6: 钢岔管水压试验变形记录表

第 页总 页

工程名称:

钢岔管编号:

仪器名称:

仪器编号:

[illegible]

测试人:

记录人:

校核人：

日期:

附录 A.0.7: 钢岔管水压试验应力记录表

第 页总 页

工程名称:

钢岔管编号:

仪器名称:

仪器编号:

[illegible]

测试人：

记录人:

校核人：

日期:

第 页总 页

仪器编号:

日期:

本标准用词说明

- 1 为便于执行本标准，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”。非必须按所指定的标准、规范或其他规定执行时，写法为“可参照……”。

ICS 编号
CCS 编号

团 体 标 准

T/CHES XXX—20XX

水利水电工程钢岔管水压试验技术规程

T/CHES XXX—20XX

条 文 说 明

20XX-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国水利学会 发 布

制定说明

在本规程制定过程中，编制组进行了广泛的调查与资料收集工作，总结了我国水利水电工程钢岔管水压试验的实践经验，参考了国内相关的技术法规和技术标准中对水压试验的要求，对我国水利水电工程钢岔管水压试验的具体技术进行了统一与细化。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《水利水电工程钢岔管水压试验技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文不具有与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

1 总 则	6
2 术语和定义	6
3 仪器设备及要求	7
3.1 一般规定	7
3.2 加卸压设备	7
3.3 水量测试设备	8
3.4 变形测试设备	9
3.6 应力测试设备	9
4 测点布置	10
4.1 一般规定	10
4.2 水压测点	10
4.3 变形测点	10
4.4 应力测点	11
4.6 残余应力测点	12
4.7 声发射测点	12
5 试验方法	13
5.1 一般规定	13
5.2 预试验	13
5.3 主试验	14
6 资料整理及报告编制	24
6.1 试验资料整理	24

1 总 则

1.0.2 《水电站压力钢管设计规范》(SL 281)规定采用新型钢种、新型结构、高水头、高强钢的钢岔管均应做水压试验;《水电站地下埋藏式月牙肋钢岔管设计规范》(NB/T 35110)要求在没有经过明确的论证和严格的过程质量控制情况下应进行水压试验;《水电站压力钢管设计规范》(NBT 35056)建议在钢岔管制作好后在条件较好的工厂进行水压试验。本文件的使用范围规定 800MPa 级及以下的钢岔管,包含了上述设计要求的内容,并适合在工厂或施工现场制作的明管。对于已安装的钢岔管,由于洞室及周边钢筋混凝土的包裹作用,通过本文件规定的测点布置方法、试验设备及安装方法、试验加载和测试方法不一定适用。

1.0.3 应要求委托方提供钢岔管的所有设计资料,充分了解钢岔管的形状尺寸、支撑结构、工作压力和最大试验压力等信息。应对钢岔管实体进行查勘,了解钢岔管实体与设计的符合性及变更情况,重点检查焊缝外观质量、焊缝无损探伤报告,以及返修记录和相关报告。

1.0.4 试验方案一般由制造单位向监理提交,试验单位配合制造单位编制技术部分。进度计划、安全与技术保障措施、应急预案等其它方面应与制造单位共同完成。

1.0.5 主要确保声发射监测的有效性,噪声源有多种,应在试验前通过声发射监测仪监测噪声水平,反复排查使场地平均噪声值宜不大于 40dB。

1.0.8 钢岔管属于特种设备,为避免水压试验过程中可能出现意外事故,减少对设备及人员伤害,规定试验及监测设备应有一定的安全距离,这个安全距离应根据现场条件及监测方法综合确定。当某些监测项目必须靠近钢岔管时,监测人员应有必要的防护措施。

1.0.9 出线装置的作用是将内壁应变片及温度的测线集中引出。出线装置一般安装在支管闷头附近,其结构形式有多种,关键在于应具有容纳内壁测线的能力和可靠的密封方式。出线装置的结构形式与密封方法决定水压试验成功与否的关键,宜在室内通过高压容器进行不小于 1.2~1.5 倍最大水压力的耐压试验,验证整个系统的可靠性。

1.0.10 在注水时应开启闷头上部的排气阀,进行充分排气,避免岔管内部形成空腔。观察排气管,当上部出水且不再有气泡时关闭旁通阀与排气阀,岔管注水结束。

2 术语和定义

2.0.1~2.0.6 循环次数、循环方法、加卸压持续时间、加卸压速率、稳压时间、压力级差的概念用图2.0.1所示来表达。

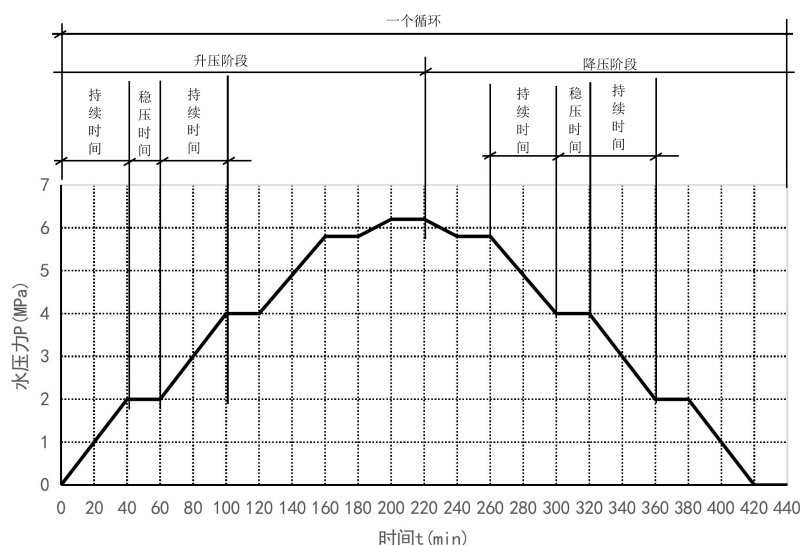


图 2.0.1 一个压力循环中的名词解释图

3 仪器设备及要求

3.1 一般规定

3.1.1 钢岔管水压试验中有较多的参数需要实时分析，常规的仪器设备已不适应快速响应需要，随着科学技术和数据智能化的发展，加卸压设备应具备压力、流量可控的功能，测试设备宜采用自动采集系统。

3.1.2 内壁传感器及导线需承受较高的水压力，对应变测量的可靠性影响较大。应确保防水应变片及导线的高压防水效果，出线装置的结构形式与密封方法是决定水压试验成功与否的关键。

3.2 加卸压设备

3.2.1 加压设备一般有两种，即电动加压设备和伺服加压设备。电动加压设备主要为水泵及控制阀，简单可靠，但加卸压速率靠手工控制难以满足要求，需增加能控制流量的限流阀装置。自动控制加卸压设备为压力伺服系统，其优点是加卸压过程中能精确控制加卸压速率，压力稳定性好，但设备昂贵而很少采用。

3.2.3 加压设备额定输出流量可根据钢岔管规模及试验参数（压力、分级与级差等）按公式（3.2.3）预估：

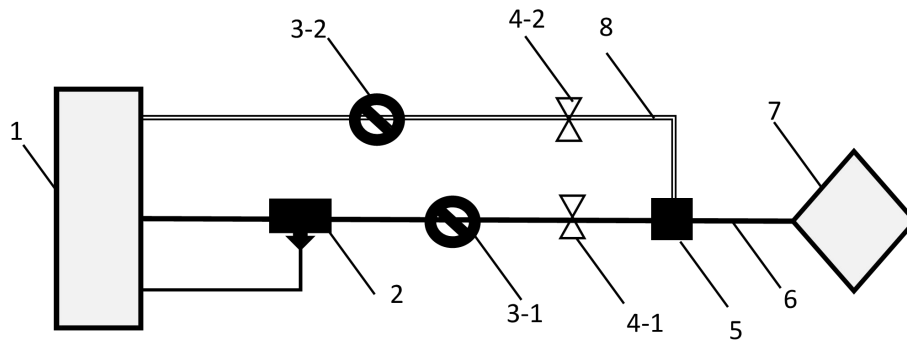
$$Q = \frac{kqvn}{pm} \quad (3.2.3)$$

式中：\$Q\$—水泵输出流量，L/min；\$q\$—钢岔管的内体积，L；\$v\$—拟确定的加卸压速率，MPa/min；\$n\$—钢岔管数量（1-2）；\$p\$—加压设备的额定压力，MPa；\$m\$—主试验的预估加压级数；\$k\$—经验值（0.04-0.05）。

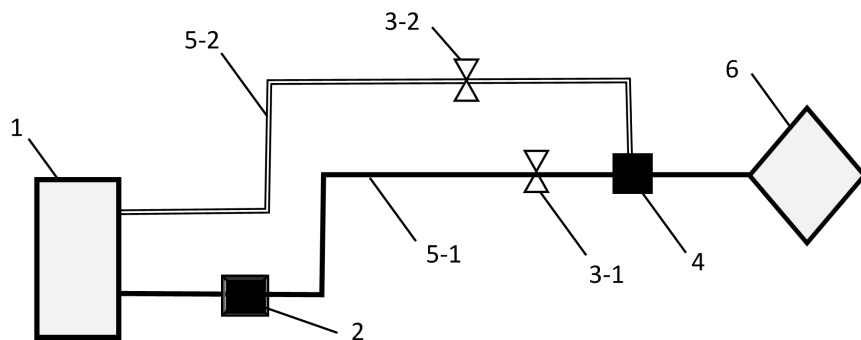
公式中\$k\$为经验推荐值，宜根据具体情况确定，一般取大值，使实际输出流量略大于规定加压速率所对应的流量。

当电动加压过大且不能满足卸压的速率不大于0.05MPa/min的要求时，加压设备的卸压管路上宜设置限流阀。采用电动加压设备的加卸压装置原理示意图见图3.2.1。加压时，关闭卸压高压水阀（4-2）和卸压限流阀（3-2）、打开加压高压水阀（4-1）和加压限流阀（3-1），启动电动泵。卸压时，关闭加压高压水阀（4-1）和加压限流阀（3-1）、打开卸压高压水阀（4-2）和卸压限流阀（3-2），停止电动泵。电动泵（2）应自带溢流阀，且应调整至合适开度，使溢流水通过管路流回水箱（1）中，高压管路（7）宜采用高压软管或无缝钢管，管路及连接件的过流孔径不能小于加压设备输出管径。其中，限流阀为恒压单向数字式，数字范围0-100，通过现场标定确定适合本钢岔管的阈值。

对于伺服加压设备，除了满足额定工作压力外，额定输出流量按本规程公式（3.2.3）预估值的1.2倍确定。图3.2.2为用伺服加压设备的管路连接示意图，其中从分流器（4）经过管路（5-2）和高压水阀（3-2）的路径便于异常情况时快速卸压。加卸压管路宜采用高压软管或无缝钢管，管路、阀件及连通件应连接牢固，在试验前应进行高压试验，试验压力应不小于最大压力的2倍，管路及连接件过流孔径应不小于加压设备输出管径。



图例：1—水箱；2—电动水泵；3—限流阀；4—高压水阀；5—分流器；6—管路；7—钢岔管
图 3.2.1 采用电动水泵时的加卸压装置原理示意图



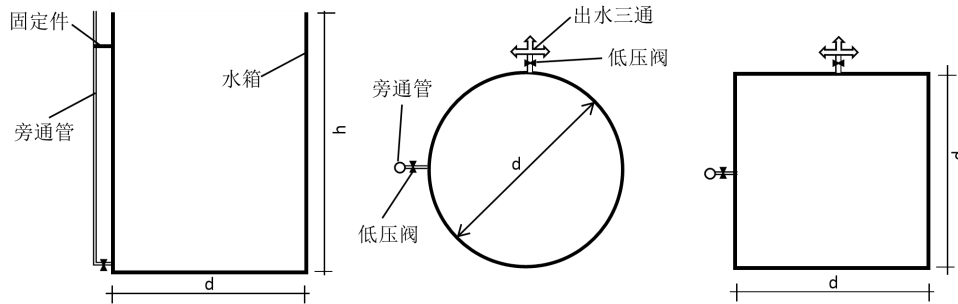
图例：1—水箱；2—伺服控制仪；3—高压水阀；4—分流器；5—管路；6—钢岔管
图 3.2.2 采用伺服控制加压设备的管路连接示意图

3.2.4 国内有关水压试验规定要求安装 2 只准确度等级为 1.5 级的压力表对水压力进行监测，精度要求不高。本规程为了实现自动采集，将其中 1 个压力表换为压力传感器。同时要求压力表准确度级别为 0.5 级，以便与压力传感器比照。

3.3 水量测试设备

3.3.1 经查阅文献，以往水压试验的水量测试多采用电子秤、量筒杯及水箱等传统方法，设备简易，虽操作繁琐但实用性强，故本规程予以保留。在操作过程中，应确保准确性并及时获得水量，应尽量少使用量筒量杯，宜采用电子台秤，电子台秤的量程及水桶容量应至少满足 2 级压力差所对应流量要求。经调研，国内用于管路上测试流量的设备适用于压力变化不大、低压、大流量场所，而钢岔管水压试验的流量较小且压力呈变化状态，因此不适合采用管道流量测量设备。

3.3.2~3 采用一定容量的标准水平断面水箱（不限形状），通过带有标准刻度的有机玻璃旁通管与水箱底部连通，可便捷获取各级压力下的水箱中水量的变化值，从而精确计算出进出水量。图 3.3.3 为水箱结构图参考图，其中出水三通用低压管分别与水泵进水口、水泵溢流口、卸压管连接。



(1) 正视图

(2) 圆形结构俯视图

(3) 方形结构俯视图

图 3.3.3 水箱结构图

3.3.4 加压过程中，水泵应能便捷地从水箱取水，水泵溢流与卸压回流的水均需全部回流至水箱。因此，水箱应安装在加压设备附近，且便于监测水量。

3.4 变形测试设备

3.4.1 变形测试方法目前有接触式和非接触式两大类，接触式位移传感器有电阻式、电磁式、振弦式、光栅式、激光式、光纤式等多种，非接触式有全站仪法、三维摄像法、三维激光成像法、激光跟踪法等工业测量系统。这些方法理论上都能用于钢岔管变形测试，但从便捷、安全、精确、快速和环境等方面综合考虑，接触式比非接触式具有精度高、安全、快速的特点，缺点是需要设置一定刚度的支架。非接触式变形测试需要在钢岔管上设置标志点，并在周围设置基准和转站点，为了提高测量精度仪器应尽量靠近测点，但因此存在安全隐患，此外观测仪器在每级压力都需移动至不同位置才能测量，且不能直观及时得出变形数据。

3.4.2 采用全站仪对钢岔管水压试验变形监测得到成功应用，虽然精度不如位移监测系统，但通过合理监测设计，系统测量精度在 20m 内可以达到毫米级。目前已有更先进的设备，其系统测量精度 20m 内可以达到 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

3.4.3 水利部水工金属结构质量检验测试中心张怀仁、李东明等成功将三维摄影仪用于钢岔管水压试验及钢结构变形监测，山东建筑工程学院于承新等亦将三维摄影仪用于钢结构变形监测，通过实践证明三维摄影仪在 10m 范围内测量精度可以达到 0.06~0.08mm。三维摄影仪具有非接触、便于携带、使用灵活以及受温度影响小等优点。其存在的不足是数据处理结果不直观、人需近距离接触钢岔管从而存在安全风险、同时摄影位置选择和测点光照条件对其测试结果具有较大影响。

3.4.4 激光跟踪测试系统主要由 2 个角度编码器、1 个单光束激光干涉仪、若干个球形目标反射镜、1 个四象限光电位置感应器及控制马达组成。此外，还包括三脚架、电脑等。

3.4.5 目前，压力钢管（容器）水压试验对变形测量的精度没有明确要求。从精度、安全及便捷性等多方面综合考量，推荐采用接触式传感器及位移采集系统。接触式位移传感器应使用回弹式位移传感器，传感器上的弹针直接与被测表面接触，通过屏蔽线引出一定距离后与数字采集仪连接进行数据采集。此方法因精度高、数据和曲线能实时采集和显示，在钢岔管水压试验中具有显著优势，且一旦钢岔管爆裂，不会对人身造成伤害。

3.6 应力测试设备

3.6.1 电阻应力监测系统

电阻应变片的种类繁多，选用时应根据测试的环境条件、被测构件的应变状态、被测构件的材料性质、应变片的尺寸和电阻值及测量精度等因素来决定。应变片宜采用自补偿型，应变片电阻值误差不大于 $\pm 0.1\Omega$ ，灵敏系数宜为 $2\Omega \pm 1\%$ ，等级宜为 A 级。粘贴应变片是一个关键步骤，需要确保应变片与钢岔管表面充分贴合，以保证测量精度。粘贴过程包括清

洁钢岔管表面、涂胶、定位应变片、排除气泡和固化等步骤。

采集仪一般采用静态电阻应变仪，测量范围及精度应满足要求，采样间隔应可调，一般不低于 1 次/s，有效通道数量应能适应应变片数量的要求并留一定的余度；应具有任意桥路连接、自补偿功能，并能自动或手动采集。

应充分考虑环境温度的影响，通过补偿片对温度进行修正，补偿片应设置在与水压试验的水压力无关的位置。

内壁应变片及导线需承受较高的水压力，对应变测量的可靠性影响较大，宜采用防水专用应变片。当采用普通应变片时，应确保应变片及导线的高压防水效果。外壁可采用普通电阻应变片。

3.6.2 光纤应力监测系统

目前市场上有国外及国内生产的光纤监测设备及光纤应变传感器。光纤传感器包括点式光纤应变传感器和连续式光纤应变传感器。应选择合适的设备，相应的仪器应与传感器匹配。有关技术参数以厂家提供的产品说明书为准。

4 测点布置

4.1 一般规定

4.1.1 钢岔管数量为奇数时，一般采用单体或两个钢岔管对接进行水压试验；当钢岔管数量为偶数时，一般采用两个钢岔管对接进行水压试验。对于两个钢岔管对接进行水压试验的情况，测点宜集中布置在其中一个钢岔管上，另一钢岔管适量布置，以进行比照，比照测点尽量布置在关键部位并对应布置。

4.1.3 钢岔管计算书一般都明确了关键部位在最大水压力下变形测点及应力测点的计算值，为便于与计算值比较，宜尽量在这些部位布置测点。

4.2 水压测点

4.2.1 为了避免在加压过程中水泵的扰动，压力传感器不宜安装在加压管进入的闷头附近。当加压管从主闷头进入时，压力传感器宜安装在某个支闷头上的排气阀或溢流阀附近。当为双岔管且加压管从某个支闷头进入时，压力传感器宜安装在另一个支闷头上。

4.2.2 压力表主要用于对水压的观察，宜安装在水泵的出水端。

4.3 变形测点

4.3.1~2 单岔管至少应按图 4.3.1-1 所示布置测点，应包括相贯线腰线、顶点和底点、月牙肋腰线、主锥和支锥腰线、及主闷头上，必要时在两个支锥闷头上各布置 1 点。双岔管至少应按图 4.3.1-2 所示位置布置测点。

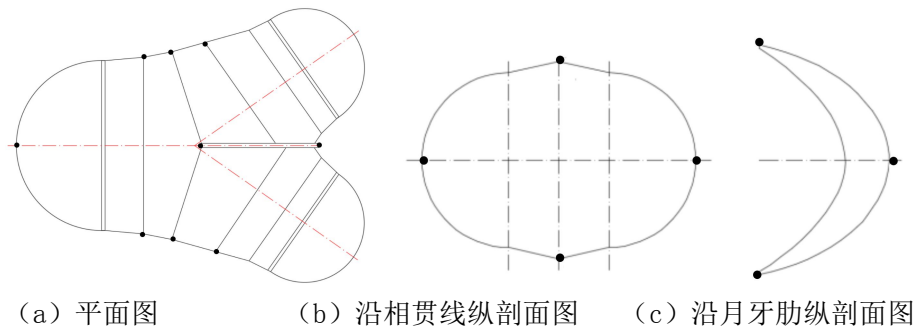


图 4.3.1-1 单岔管变形测点布置示意图

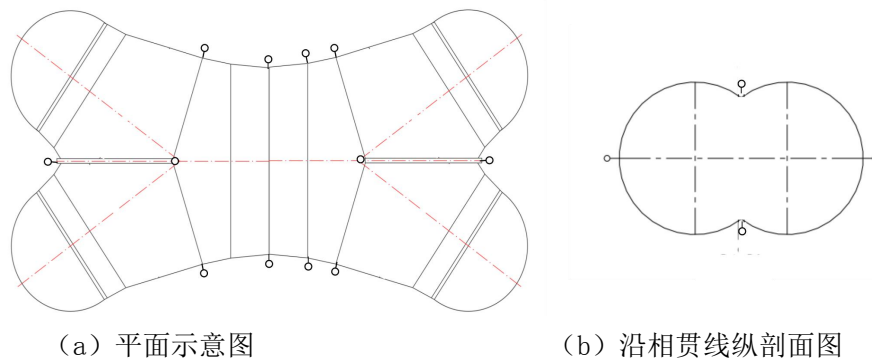


图 4.3.1-2 双岔管变形测点布置示意图

4.3.3 位移传感器需要用测杆，支架一般包括测杆、支座等，主要目的是提供一套具有足够刚度、统一基准的结构。传感器通过磁性表架固定在测杆上，多个测杆形成支架，支架与地面通过螺栓连接。支架不能与钢岔管表面接触，并要具备较好的稳定性。以相贯线四周测杆安装为例，参见图 4.3.2 所示。

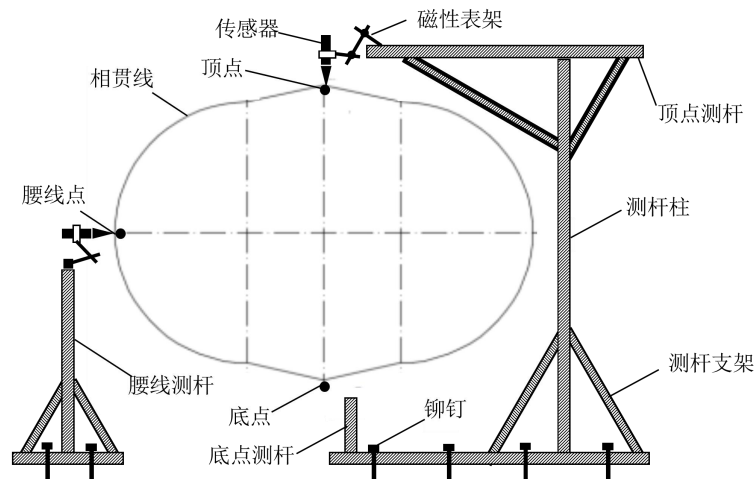


图 4.3.2 变形测试的支架布置示意图

4.4 应力测点

4.4.1~4 根据有限元计算情况确定测点具体位置。所谓钝角区、肋板旁管壳区和月牙肋板处，以及闷头和连接锥管，是指腰线转折角附近、肋板、肋旁管壁、主支锥相贯线附近、岔管整体膜应力区。内外壁对应布置的目的是为了便于计算材料的膜应力。图 4.4.1 为单岔管将应变测点主要布置在上部的具体实例，双岔管参照对称布置。

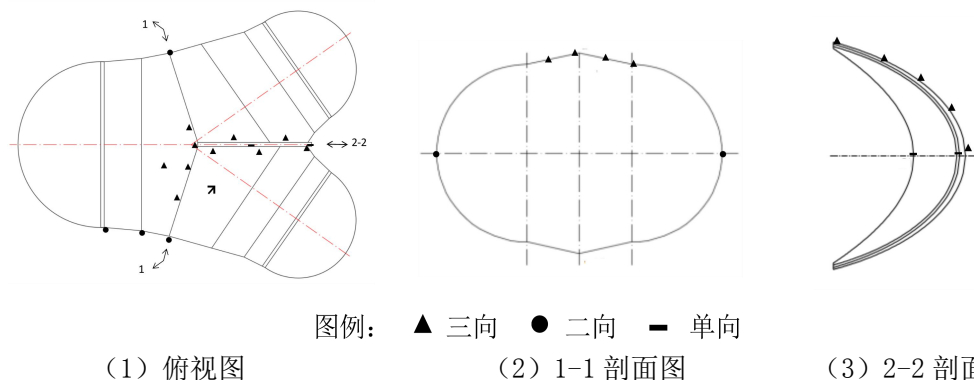


图 4.4.1 单岔管应变测点布置示意图（主要为上部，亦可主要为下部）

4.4.5 应充分利用连续式光纤法具有测点多的特点,通过连续布置,能反映结构应力的对称性,在设备容量及采样时间足够的条件下宜多采集数据。

4.6 残余应力测点

4.6.1 X射线衍射法单岔管残余应力测区布置参见图4.6.1,测区布置在相贯线顶点或底点附近及腰线、主锥环缝、纵缝及纵缝与环缝交叉点等位置。当采用超声临界折射纵波法或电磁法时,宜对肋板旁组合焊缝布置测区。试验前后测点的位置尽量一致,当无法达到完全一致时,位置误差宜不大于 $\pm 10\text{mm}$ 。

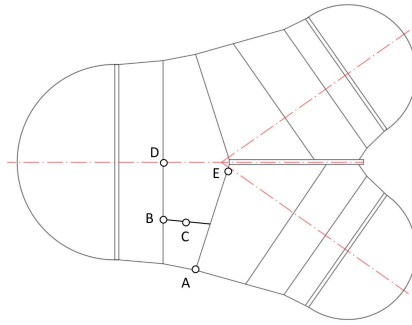


图 4.6.1 单岔管残余应力测区布置示意图

4.6.2 焊缝残余应力测点布置参见图4.6.2。

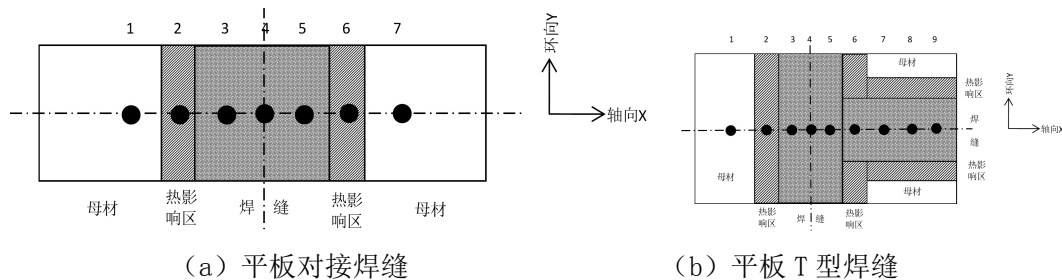
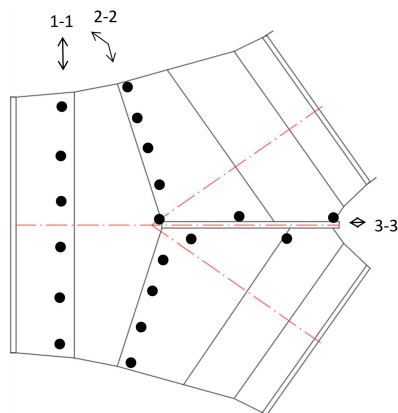


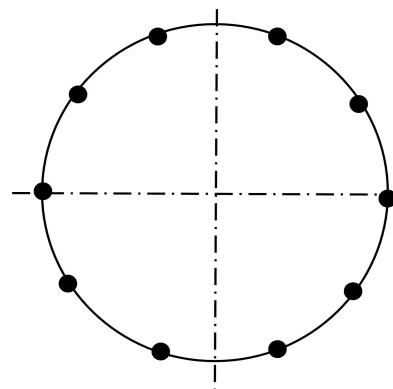
图 4.6.2 焊缝残余应力测点布置示意图

4.7 声发射测点

4.7.1~2 测点位置及数量应根据钢岔管结构特点、定位方式及仪器通道数量综合确定,前提是应保证灵敏度要求。单岔管测点布置典型图参见图4.7.1,双岔管可按单岔管对应布置。



(a) 平面投影图



(b) 1-1 剖面 (主锥环缝)

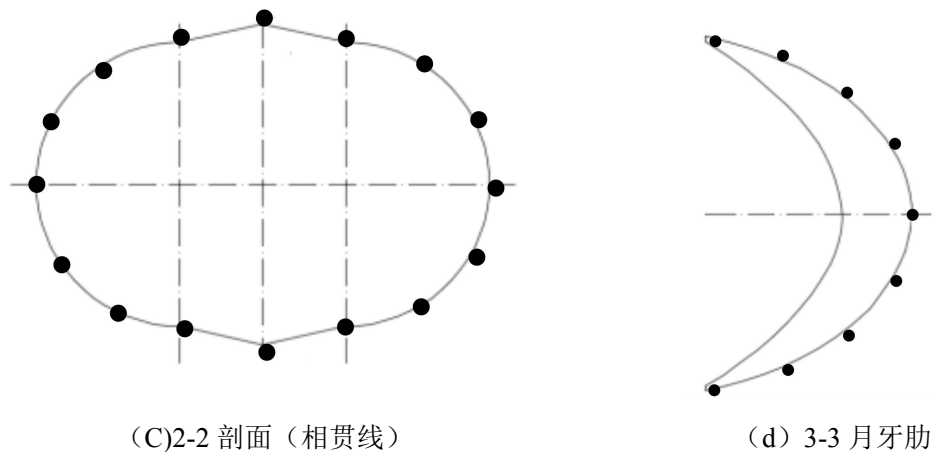


图 4.7.1 单岔管声发射测点布置示意图

5 试验方法

5.1 一般规定

5.1.1 预试验的目的主要是检验钢岔管水封系统、支撑结构是否异常、以及加压系统与监测系统是否正常。主试验主要是检验钢岔管制作及焊接施工质量；验证结构的可靠性；钝化缺陷或消除尖端应力；获得应力分布规律，与有限元分析计算成果相互印证；评价水压试验消除焊接残余应力的效果。主试验是按最大试验水压力进行独立的两次加卸压循环。

5.1.2 目前国内残余应力无损检测方法有 X 射线衍射法、电磁法、超声临界折射纵波法、磁弹法等，这些方法有相应的现行规范，应根据钢岔管特点合理选择。相对而言，X 射线衍射法具有直观、环境影响小，精度高并能对三向应力进行测试等优点，在钢岔管上应用广泛。X 射线衍射法也有其自身的局限性，如设备相对复杂，对 T 型焊缝测试困难等。其它方法的优点是受焊缝结构形状影响小、快速等，但精度相对较低、需通过标定曲线才能获得残余应力。在条件允许时，可采用 2 种及 2 种以上方法互补或对比。

5.1.3 试验过程中，钢岔管及其密封件出现渗漏、支撑结构、管体出现异响等情况时，应立即快速卸压，排除异常后重新开始试验。

5.1.4 监测项目有多种方法并各有优缺点，应根据钢岔管实际情况选择精度高、便捷、可靠的监测设备。在适当考虑监测仪器及监测技术发展要求同时，还必须考虑设备应用的安全性。声发射具有超前预警作用，应将两者结合预判。当应力接近预警值且声发射源集中分布且有增加趋势时，应暂停加压，检查钢岔管是否有渗漏或压力下降的情况。若需继续加压应减小压力级差，并逐级保压观察和检查。

5.2 预试验

5.2.1~5.2.3 NB/T35110 要求进行预试验但未明确试验方法，其它规范也未对此作出规定。目前的有关文献资料显示，许多钢岔管水压试验都进行了预试验。国内部分工程预试验统计情况见表 5.2.1-1。从统计结果可见，预试验最大压力在最高压力的 35%~62% 范围内，加卸压级数在 1~10 级范围内，加卸压级差在 0~2.5MPa 范围内，每级稳压时间在 10min~30min 不等，最大压力下稳压时间为 30min。在加卸压速率方面，部分工程未按不大于 0.05MPa/min 执行。基于以上统计资料，预试验的最大试验压力可取主试验最大试验压力的 1/3~1/2。预试验压力宜根据最大压力分级加卸压，分级方法参见表 5.2.1-2。每级稳压时间宜不小于 10min，最高压力下稳压时间宜不小于 30min。

表 5.2.1-1 部分工程预试验情况

工程名称	年份	主试验最高压力(MPa)	预试验				
			压力(MPa)	分级（级）		稳压时间（min）	
				升压	卸压	升压	卸压
浙江长龙山	2019	10	2	4	4	每级 30	
吉林敦化	2018	10	5	10	10	每级 10，最高级 30	
安徽绩溪	2020	6.5	4	2	2	每级 30	
河北丰宁	2020	6.9	4	4	2	每级稳压 30	
呼和浩特	2019	9.06	5	5	5	每级 10~15	不祥
江苏宜兴	2009	5.42	2	1	1	每级 10	每级 15
辽宁清原	2022	6.5	4	8	8	每级 30	
浙江仙居	2023	5.6	2	4	4	每级 10，最高级 30	
浙江宁海	2023	6.0	2	4	0	每级 10，最高级 30	连续卸压

表 5.2.1-2 预试验分级与级差示例

最高压力 (MPa)	路径	各级压力 (MPa)					
		0	1	2	3	4	5
0.5	加压	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	
	卸压	0.0	0.2	0.3	0.4		
1	加压	0.0	0.5	0.7	0.9	1.0	
	卸压	0.0	0.5	0.7	0.9		
2	加压	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	
	卸压	0.0	0.5	1.0	1.5		
3	加压	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
	卸压	0.0	1.0		2.0	2.5	
4	加压	0.0	1.0	2.0	3.0	3.5	4.0
	卸压	0.0	1.0	2.0	3.0		
5	加压	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	卸压	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	
6	加压	0.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
	卸压	0.0	2.0	3.0	4.0	5.0	

5.2.4~5.2.5 预试验期间宜对所有参数进行监测,分析监测数据与水压关系、环境对监测数据影响等。当有部分测点失效或数据异常时,应根据测点的重要性决定是否进行更换,当环境对监测数据影响较大时应分析原因并予以排除,不可避免时应择机进行。试验过程中应关注渗水、异响情况,发现异常时暂停试验,排除异常后再次试验,并停止加压做好记录。

5.2.6 对监测数据进行整理,分析监测参数与水压力相关性、加卸压速率、稳压时间等的符合性,为主试验做好准备。

5.3 主试验

5.3.1 预试验后休止 2h 以上是为了让钢岔管应力得到充分调整,以减小对主试验初值的影响,另一目的是使试验人员有充分的时间对数据进行整理分析。

5.3.2 有关设计规范要求宜进行“两个完整的压力循环”,但未说明压力循环路径,一般理

解为：对 1 个循环而言是指按一定级差从初始水压开始逐级升压至最大水压后再逐级卸压至初始水压，这个过程再重复进行 1 次。国内部分抽水蓄能电站钢岔管水压试验的实际循环方法统计结果见表 5.3.2。

表 5.3.2 主试验循环方法与循环次数典型实例统计

项号	工程名称	最高压力 (MPa)	循环方法与循环次数
1	安徽绩溪	6.5	1 个大循环，最高压力相同
2	河北丰宁	6.9	2 个大循环，最高压力相同
3	重庆蟠龙	5.4	两个循环，最高压力相同
4	辽宁清原 3#	6.5	两个大循环，两次的最高压力不同
5	辽宁清原 1#	6.3、6.5	两个大循环，两次的最高压力不同
6	辽宁清原 2#	6.0、6.2	两个大循环，两次的最高压力不同
7	浙江长龙山	9、10	两个大循环，两次最大压力不同
8	浙江宁海	5.6	第一次试验先低压循环再高压循环，第二次试验 1 个循环
9	江苏宜兴	2、2、4、5.3、5.42	5 个循环，每个循环最大压力逐个增大
10	陕西镇安	8.67	某级加压后降压，再逐级增加，两个循环相同

1 关于循环方法，总结为以下三类

(1) 分级大循环法。逐级加压至最高压力后再逐级卸压，形成 1 个大循环，表 5.3.2 中第 1~7 项属于此类，压力循环典型曲线如图 5.2.1 (a) 所示。

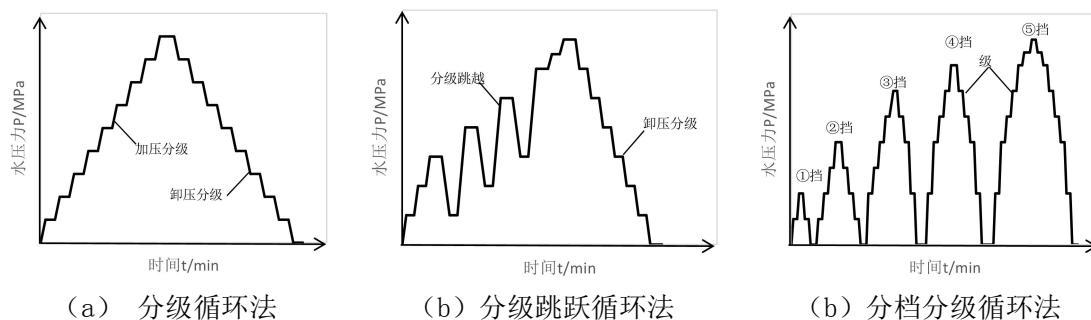


图 5.2.1 不同压力循环方法典型曲线

(2) 分级跳跃大循环法，即加压阶段在某级采用升压-降压-升压的跳跃方式，直至最大试验压力后再分级卸压，表 5.3.2 中第 8 项属于此类，压力循环典型曲线如图 5.2.1 (b) 所示。如陕西镇安抽水蓄能电站钢岔管，升压分 5 级，第一级 0.4MPa，第二级升压至 4.34MPa 后降压至 2.17MPa，第三级从 2.17MPa 升压 6.5MPa 后降压至 4.34MPa，第四级由 4.34MPa 升压至 7.8MPa，第五级由 7.8MPa 升压至 8.67MPa，分 4 级逐级卸压。

(3) 分挡分级循环法。即将最高试验压力分多挡，每挡的压力不同，每挡进行独立的分级循环，表 5.3.2 中第 9 和 10 项属于此类，压力循环典型曲线如图 5.2.1 (c) 所示。如浙江宁海钢岔管水压试验分两挡，低挡分级循环最高试验压力为 4MPa，升压分 8 级，卸压分 3 级，高挡分级循环最高压力 5.6MPa。江苏宜兴钢岔管水压试验分五挡，第 1 挡直接施加至 2MPa，再直接卸压至 0；第 2 挡分 3 级施加至 2MPa，再直接卸压至 0；第 3 挡分 8 级施加至 4MPa，分 2 级卸压至 0；第 4 挡在 4MPa 前按第 3 挡加压方法进行，4~5.3MPa 阶段分 3 级施加至 5.3MPa，然后分 3 级卸压；第 5 挡分 11 级施加至 5.42MPa，然后分 3 级卸压至 0。

2 两次主试验的循环方法不同

对于第二次主试验，有与第一次主试验循环方法相同的，也有不同的。如浙江宁海抽水

蓄能电站钢岔管第一次主试验采用 4MPa 分级小循环后再进行分级大循环，第二次主试验采用不分档大循环。

3 第一次主试验后应间隔不少于 4h 后进行第二次主试验，主要是为了让钢岔管应力得到充分调整，以减小对主试验初值的影响，另一目的是使试验人员有充分的时间对数据进行整理分析。

5.3.3 主试验加压及稳定标准应符合下列规定：

1 国内部分抽水蓄能电站钢岔管主试验的分级与级差情况统计见表5.3.3-1。可见，各工程钢岔管水压试验分级方法并不统一。加压阶段分级在3~16级范围内，分级级数与应力大小及级差有关。若按最大压力与级数的比值情况来统计，级差在0.41~2.17MPa范围内，平均级差约为1MPa。进一步比较说明，大多数工程为分段分级，即在低压段级差大，高压段级差小。对于卸压阶段的分级，有一半工程的卸压分级与加压相同，另一半工程采用跳级卸压。有的工程在高压阶段的卸压级差与加压级差一致，在低压阶段跳级，甚至有的不分级而连续卸压。为了统一，规定加卸压级差以0.5MPa为基准。对于低压钢岔管，级差可小于0.5MPa，并分5级为宜；对于高压钢岔管，高低压段级差可适当增减，以控制总试验时间。主试验分级方法参见表5.3.3-2。

2 关键压力是指钢岔管正常工况下内水压力。

表 5.3.3-1 国内部分抽水蓄能电站钢岔管主试验分级与级差情况统计

工程名称	年份	最高压力 (MPa)	级数（级）				级差	
			第一次		第二次		第二次主试验	
			加压	卸压	加压	卸压	加压	卸压
宝钢模型	2015	9.6	8	4	8	6	分段：6MPa 前为 2，6~7MPa 为 1MPa，7~9.6MPa 为 0.5MPa	
浙江仙居	2015	6.8	4	4	4	4	分段：分别为 2、1.6 和 1.2MPa	
江苏溧阳	2015	3.9	4	4	4	4	1MPa	
吉林敦化	2018	10	10	5	10	5	1MPa	
浙江长龙山	2019	9（10）	5	5	6	6	分段：8MPa 前为 2MPa、8~10MPa 段为 1MPa	
江西洪屏	2015	6.09	4	4	4	4	分段：4MPa 前 2MPa，4~5.8MPa 段为 1.8MPa，5.8~6.1MPa 段为 0.3MPa	
河南天池	2020	7.14	10	0	10	0	分段：5MPa 前 1MPa，5MPa 后 0.5MPa	连续
安徽金寨	2021	4.86	10	10	10	10	0.5	
安徽绩溪	2020	6.5	3	3	3	3	小循环级差为 2MPa，大循环级差由 4MPa 逐级减半	
河北丰宁	2020	6.9	8	4			分段：5MPa 前 1MPa，5MPa 后减小为 0.5~0.8MPa	
呼和浩特	2019	9.06	13	13	13	13	分段：5MPa 前为 1MPa，5MPa 后为 0.5MPa	
江苏宜兴	2009	5.42	13	4	11	4	0.1~1MPa	1.5~2MPa
辽宁清原	2022	6.5	16	16	16	16	分段：5MPa 前为 0.5MPa，5MPa 后为 0.25MPa	
重庆蟠龙	2022	5.4	6	6	6	6	分段：5MPa 前为 1MPa，50MPa 后为 0.4MPa	
陕西镇安	2022	8.7	5	4	5	4	不等级差	
浙江宁海	2023	6.0	13	4	13	4	0.5MPa	1.5~2MPa

表 5.3.3-2 主试验分级与级差示例

最高压力 (MPa)	路径	各级压力 (MPa)											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

最高压力 (MPa)	路径	各级压力 (MPa)												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	加压	0.0	0.5	0.7	0.9	1.0								
	卸压	0.0	0.5	0.7	0.9									
2	加压	0.0	0.5	1.0	1.5	1.8	2.0							
	卸压	0.0	0.5	1.0	1.5	1.8								
3	加压	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0						
	卸压	0.0		1.0	1.5	2.0	2.5							
4	加压	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0					
	卸压	0.0	1.0		2.0		3.0	3.5						
5	加压	0.0	1.0	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0				
	卸压	0.0	1.0	2.0		3.0		4.0						
6	加压	0.0	2.0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	5.75	6.0			
	卸压	0.0	2.0	3.0		4.0		5.0		5.75				
7	加压	0.0	2.0	4.0	5.0	5.5	5.75	6.0	6.25	6.5	6.75	7.0		
	卸压	0.0	2.0	4.0		5.5		6.0		6.5				
8	加压	0.0	2.0	4.0	5.0	5.5	6.0	6.5	6.75	7.0	7.25	8.0		
	卸压	0.0	2.0	4.0		5.5		6.5		7.0				
9	加压	0.0	2.0	4.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.25	8.5	8.75	9.0	
	卸压	0.0	2.0	4.0	6.0		7.0		8.0		8.5			
10	加压	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	8.5	8.75	9.0	9.25	9.5	9.7	9.9	10.0
	卸压	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0			9.0		9.5			
12	加压	0.0	4.0	6.0	8.0	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.3	11.5	11.8	12.0
	卸压	0.0	4.0	6.0	8.0			10.0		11.0		11.5		

3 SL/T 281第10.0.3条、NB/T 35056第10.2.3条、NB/T35110第9.2.4条规定了加卸压速率不宜大于 0.05MPa/min；SL432-2008第9.7条、DL/T 5017第9.0.4条规定了加压速率，对卸压速率未作规定；GB50766第8.0.8条规定加压速度宜不大于0.3MPa/min，当压力大于10MPa以上时，加压速度宜不大于0.2MPa/min，对卸压速率未作规定；GB/T 150.4第11.4.9.4条未作规定（要求缓慢）。

查阅的文献资料统计见表5.3.3-3。从表中可见，大部分工程加卸压速率都不满足0.05MPa/min的要求。具体来说，有的工程加卸压速率大于0.05MPa/min，如表中第2、4、7项的加压速率分别为0.1MPa/min、0.15~0.3MPa/min和0.08MPa/min；表中第1、3、5、6、8项文献中未给出压力与时间的关系曲线，文字描述加卸压速率不大于0.05MPa/min；表中第9项加卸压速率等于0.05MPa/min；表中第10项加压速率在0.008~0.01MPa/min范围内，远小于0.05MPa/min。对于卸压速率，大于0.05MPa/min的包括第2、4、7项，远小于0.05MPa/min的有第10项。可见有50%的案例未给出水压力与时间曲线，因此无法确定加卸压速率是否满足要求；有30%的案例中加卸压速率大于要求；10%的案例中加卸压速率严格按照要求控制；10%的案例中加卸压速率远小于要求。

加压速度过快，可能会导致钢岔管在某压力下产生变形或应力的突变，尤其在高压阶段如果升压速度快，产生较大的动压比，容易对钢管及其附属设备产生危害，降低其使用寿命，因此应避免压力波动。加压速度太慢，不利于钢岔管焊缝微观缺陷的钝化，而且试验时间延

长后，环境温度变化会对测试结果产生一定的影响，因此加卸压速率被限制在 0/05~0.02MPa/min 范围内。

表 5.3.3-3 国内部分抽水蓄能电站钢岔管主试验加卸压速率统计

序号	工程名称	最高压力 (MPa)	加压速率 (MPa/min)	卸压速率 (MPa/min)
1	浙江仙居	6.8	≤0.5	/
2	吉林敦化	10	0.1	0.2
3	江西洪屏	6.09	≤0.05	0.05
4	河南天池	7.14	0.15~0.3	连续
5	安徽金寨	4.86	≤0.05	≤0.05
6	安徽绩溪	6.5	≤0.05	10min
7	河北丰宁	6.9	0.08	0.07
8	呼和浩特	9.06	≤0.05	同加压
9	辽宁清原	6.5	0.0	同加压
10	浙江宁海	6.0	0.008~0.01	0.01-0.04

4 设计规范 (SL/T 281、NB/T 35056 和 NB/T 35110) 规定各级稳压时间及最大压力下的稳压时间不应短于 30min，但未明确是加压还是卸压的各级稳压时间；制造安装及验收规范 (SL432、DL/T 5017 和 GB50766) 规定升压至工作压力时保持 30min 以上，升压至最大压力时保持 30min 以上，下降至工作压力时保持 30min 以上，但未规定加卸压分级过程中每级的稳压时间。有关规范关于稳定时间情况统计结果见表 5.3.3-4。国内部分工程水压试验稳定时间情况参见表 5.3.3-3。

表 5.3.3-4 有关规范稳压时间的规定

序号	规范代号	规范条款	稳压时间	评价
1	SL/T 281	第 10.0.3 条	各级稳压时间及最大压力下的稳压时间，不应短于 30min。	设计规范规定了各级稳压时间，应该理解为加卸压各级的保压时间不应短于 30min。
2	NB/T 35056	第 10.2.3 条	各级稳压时间及最大试验压力下的保压时间，不应短于 30min。	
3	NB / T 35110	第 9.2.4 条	各级稳压时间及最大试验压力下的保压时间，不应短于 30min。	
4	SL432	第 9.7 条	升压至工作压力时保持 30min 以上，升压至最大压力时保持 30min 以上，下降至工作压力时保持 30min 以上。	未规定分级过程中每级的稳压时间。
5	DL/T 5017	第 9.0.4 条	升压至工作压力时保持 30min 以上，升压至最大压力时保持 30min 以上，下降至工作压力时保持 30min 以上。	
6	GB50766	第 8.0.8 条	升压至工作压力时保持 30min 以上，升压至最大压力时保持 30min 以上，下降至工作压力时保持 30min 以上。	
7	GB/T 150.4	第 11.4.9.4 条	缓慢升压至设计压力确定无误后升压至试验压力，保压时间一般不少于 30min；加压未按规定。	

国内部分抽水蓄能电站钢岔管主试验的稳压时间统计结果见表 5.3.3-5。从表中可见，

所列案例中加压过程中每级稳压时间不等，在 5~30min 范围内，最高压力和工作压力下稳压时间为 30min 或 60min。卸压过程中每级稳压时间在 0~40min 范围内。

表 5.3.3-5 国内部分抽水蓄能电站钢岔管主试验稳压时间统计

工程名称	第二次主试验			稳压时间	
	最高压力 (MPa)	级数 (级)		加压	卸压
		加压	卸压		
浙江仙居	6.8	10	3	每级 10min, 分别在 2、4MPa 时为 30min; 5.6MPa 时为 60min	/
浙江长龙山	10	7	7	4MPa 前每级 30min, 4MPa 后每级 60min	每级 30min
吉林敦化	10	10	5	每级 20min, 分别在 5MPa 和 10MPa 时为 30min	10min
江苏溧阳	3.9	4	4	每级 10min	每级 10min
江西洪屏	6.09	4	4	每级 10min, 最高级 30min	每级 10min
河南天池	7.14	10	0	每级 5min	0min
安徽金寨	4.86	10	10	每级 10min	
安徽绩溪	6.5	3	3	每级 10min, 分别在 6MPa 和 6.5MPa 为 60min	每级 10min
河北丰宁	6.9	8	4	5MPa 前 30min; 5MPa 后 30~60min	5~7MPa 为 30min, 0~5MPa 为 40min
呼和浩特	9.06	13	13	每级 10~15min, 最高级 30min	
江苏宜兴	5.42	11	3	每级 10min, 最高级 60min	每级 15min
辽宁清原	6.5	16	16	每级 30min	
重庆蟠龙	5.4	6	6	每级 30min	
陕西镇安	8.7	5	4	每级 30min	
浙江宁海	6.36	11	4	每级 10min, 分别在 2、4、5.5 和 6.5MPa 为 30min	每级 10min

为了说明加卸压的稳定时间对应力和变形的影响，主编单位在辽宁清原 2#钢岔管和浙江宁海钢岔管进行了针对性研究。

1 稳压期间变形变化规律：该工程 2#钢岔管为单体水压试验，从加或卸压到本级压力后连续采集变形数据，变形测试资料如下：

1) 加压阶段：由 5.2MPa 加压至 5.5MPa 后，稳压 40min 的变形与时间关系曲线见图 5.3.3-1。在 40min 的稳压时间内变形增加了 19 μ m，在稳压 10min 前变化速率较大，累计变化了 13 μ m，占总变形的 68.4%，在稳压 30min 前累计变化了 18 μ m，占总变形的 94.7%，表明稳压 30min 后变形趋于稳定。由 5.8MPa 加压至 6.0MPa 后稳压 45min 的变形与时间关系曲线见图 5.3.3-2。在 45min 的稳压时间内变形增加了 33 μ m，在稳压 10min 前累计变化了 25 μ m，占总变形的 70%。在稳压 30min 前累计变化了 30 μ m，占总变形的 91%，表明稳压 30min 后变形趋于稳定。统计分析结果见表 5.3.3-6。

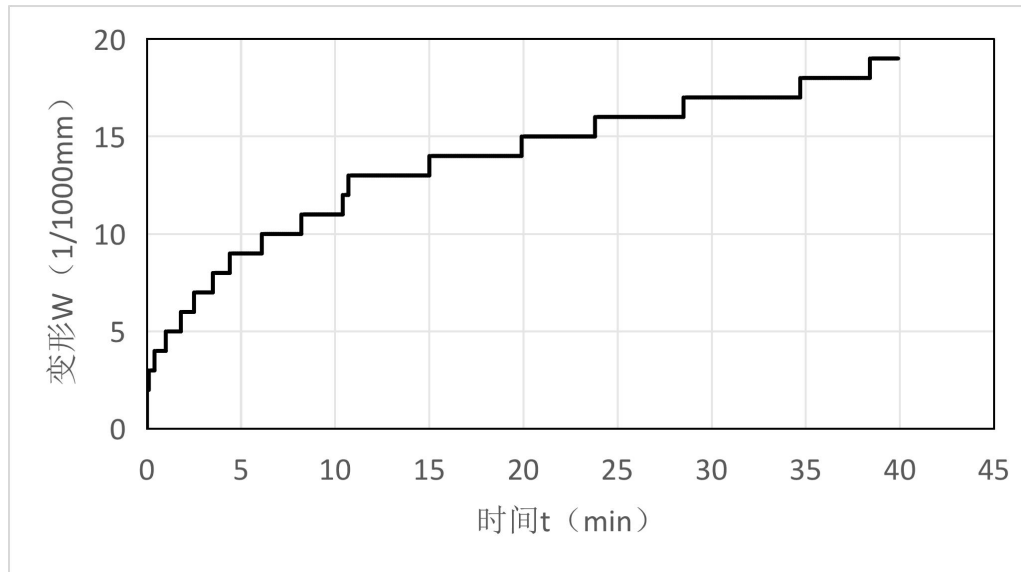


图 5.3.3-1 由 5.2MPa 加压至 5.5MPa 后稳压 40min 的变形变化曲线

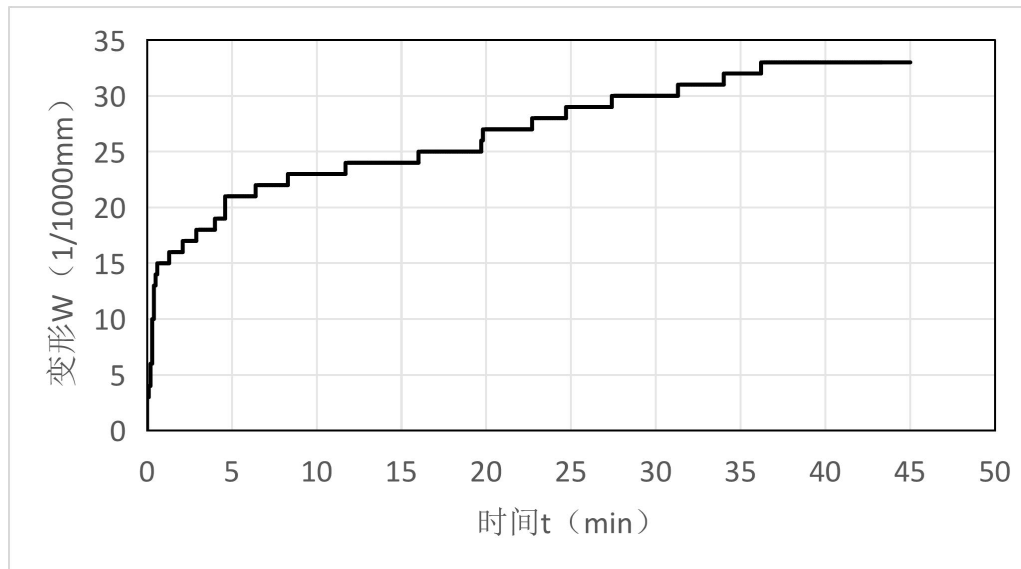


图 5.3.3-2 由 5.8MPa 加压至 6.0MPa 后稳压 40min 的变形变化曲线

表 5.3.3-6 加压阶段稳压期间变形变化情况统计

累计时间 (min)	5.5MPa		6MPa	
	变形量 (μm)	占总变形的比例 (%)	变形量 (μm)	占总变形的比例 (%)
5	9	47	21	64
10	13	68	23	70
15	14	74	24	73
20	15	79	27	82
25	16	84	29	88
30	18	95	30	91
35	18	95	32	97
40	19	100	33	100
45			33	100

2)卸压阶段:由 5.5MPa 卸压至 5.0MPa 后稳压 30min 的变形与时间关系曲线见图 5.3.3-3, 统计分析结果见表 5.3.3-7。在稳压 20min 内变形仅增加了 7 μm , 而且在稳压 20min 后趋于稳定; 由 4.5MPa 卸压至 4.0MPa 后稳压 30min 的变形与时间关系曲线见图 5.3.3-4 所示, 在稳压 30min 内变形变化了 13 μm , 在稳压 20min 后稳定。

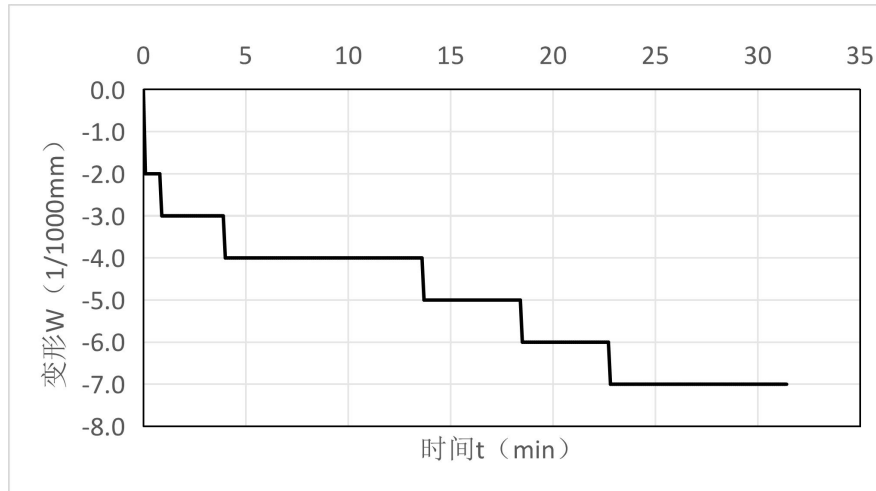


图 5.3.3-3 由 5.5MPa 卸压至 5.0MPa 后稳压 30min 的变形变化曲线

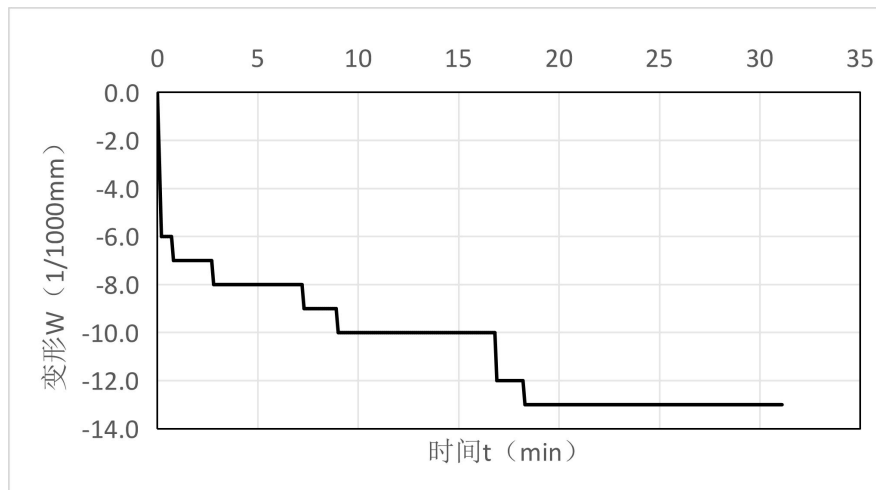


图 5.3.3-4 由 4.5MPa 卸压至 4.0MPa 后稳压 30min 的变形变化曲线

表 5.3.3-7 卸压阶段稳压期间变形变化情况统计

时间 (min)	5MPa		4MPa	
	变形量 (μm)	占总变形的比例 (%)	变形量 (μm)	占总变形的比例 (%)
5	4	57	8	62
10	4	57	10	77
15	5	71	10	77
20	6	86	13	100
25	7	100	13	100
30	7	100	13	100

3) 以上实测数据说明, 对于加压阶段, 稳压 20min 后变形完成了 80%以上, 表明本级压力下钢岔管变形调整已基本完成。对于卸压阶段, 在稳压 20min 后变形完成了 80%以上,

表明本级压力下钢岔管变形调整已基本完成。

2 稳压期间应力变化规律

钢岔管内部某测点在由 5.5MPa 加压至 6MPa 后稳定了 60min，应变与时间关系曲线见图 5.3.3-5，可见在 30min 后应变基本稳定；在由 5.6MPa 卸压至 4MPa 后稳定了 30min，应变与时间关系曲线见图 5.3.3-6，可见 20min 后应变基本稳定。

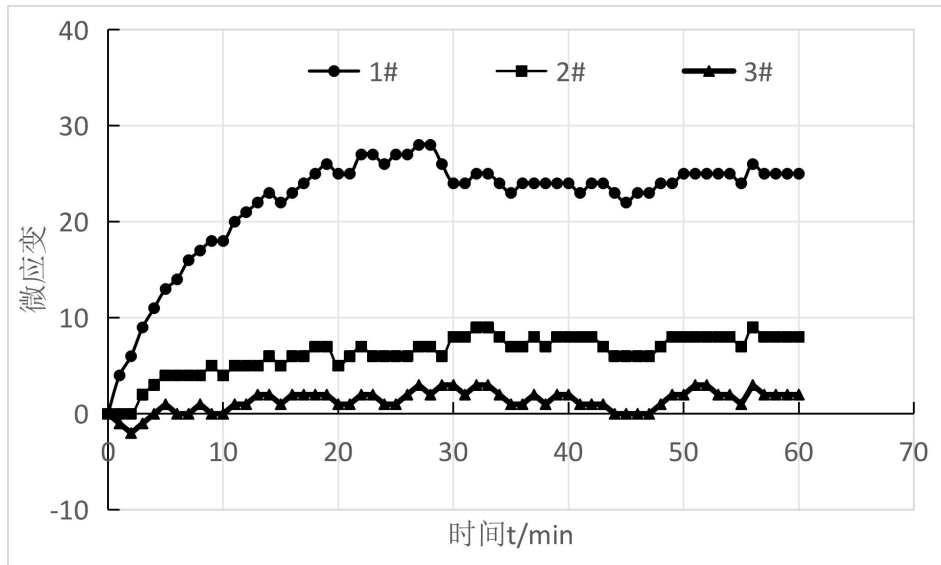


图 5.3.3-5 某钢岔管内部测点在由 5.5MPa 加压至 6MPa 后的应变与时间关系曲线

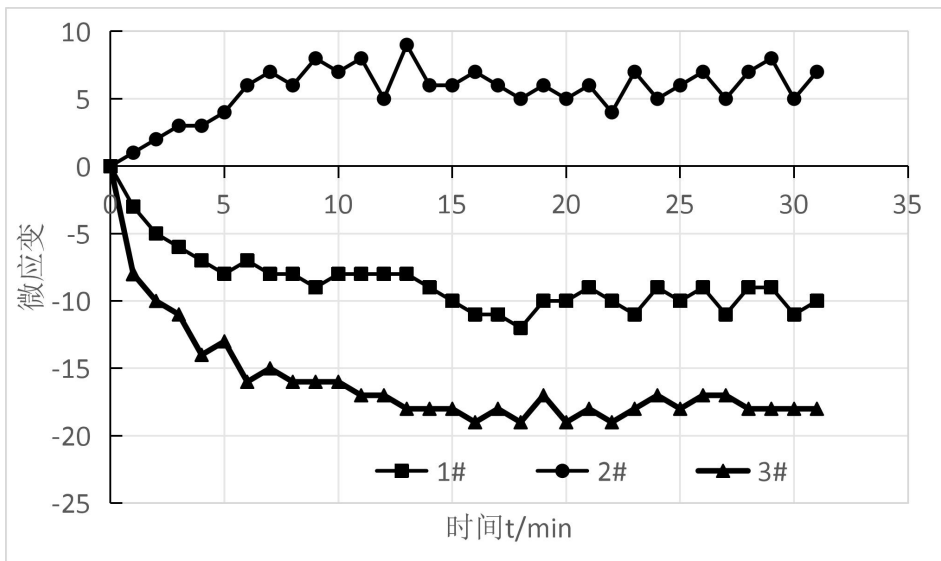


图 5.3.3-6 某钢岔管相贯线底点在从 5.6MPa 卸压至 4MPa 后的应变与时间关系曲线

3 稳压时间的确定

从以上研究可见，升压期间每级稳压 30min、卸压期间每级稳压 20min 后变形及应变基本无显著的变化，因此本规程按试验研究结果确定。

5.3.4 变形监测

1 采用传感器法监测时，位移传感器有电阻式、电磁式、振弦式、光栅式、激光式和光纤式等多种类型。各类型的传感器对野外场地的适应能力可能有所不同，温度引起的数据漂移是主要的影响因素，因此，规定空采不少于 30min。当相邻 10min 的数据漂移小于 $\pm 10\mu\text{m}$

时,可开始试验。考虑钢岔管各部位在水压作用下可能产生鼓胀和收缩情况,回弹式传感器的测针会随测点表面变形而伸缩,为保证整个水压试验期间测点的变形量在传感器量程以内,其初始值宜根据预估的变形大小和方向调整至合理位置。

2 采用工业测量系统需较长的观测与数据处理时间,宜在每级稳压时间结束前完成数据采集、处理,并得到结果。当不能满足这一要求时应增加设备。

5.3.5 应力监测

1 当某些测点应变监测数据漂移大于 $\pm 10\mu\epsilon$ 时,应重点检查这些测点导线间的绝缘电阻和接地电阻是否比试验前有所下降,以及补偿片是否有效等。若大多数测点仍然达不到漂移要求,则应观察温度变化情况。一般情况下,钢岔管都在简易工棚内进行,保温效果不佳。当温差较大时,温度的变化对钢岔管外壁会产生温度附加应力,对钢结构会产生附加应力,这可能会引起较大的测量误差。因此,试验前应充分了解近几天环境温度的变化规律,尽量将试验时间选择在温差较小的时段进行。图 5.3.5 为北方某工程钢岔管 48h 温度实测曲线。可见,22 日的温差明显小于 23 日,因此根据天气预报选择在 22 日凌晨开始试验,至最大试验压力结束前,温差大约为在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 内。

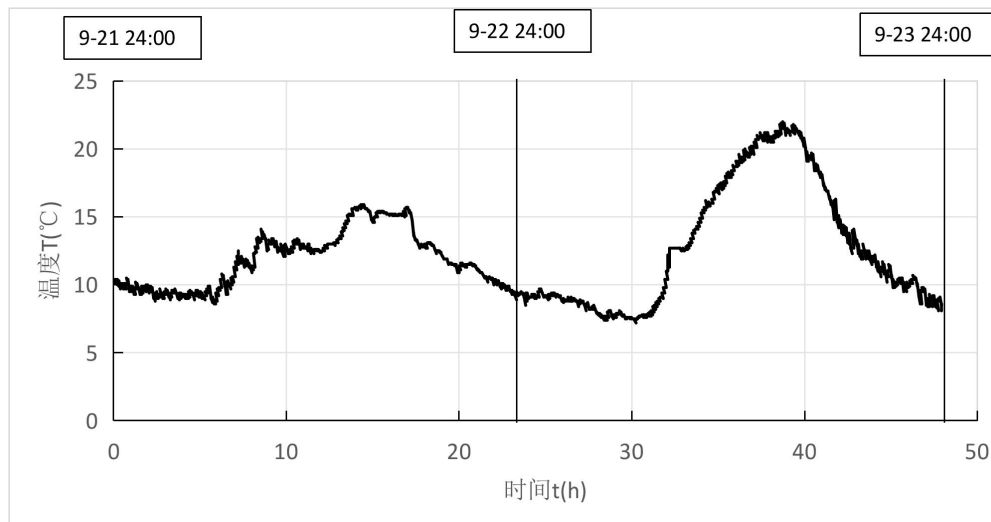


图 5.3.5 某工程钢岔管附近 48h 温度曲线

2 应力监测是所有监测项目的重点,应设置应力预警值,应力预警值宜为设计最大应力限值的 90%。监测过程中应实时观察、记录、分析数据及曲线,还应关注应力以及声发射数据随水压力的变化趋势。

5.3.6 声发射监测

有关水压试验的规范中未明确要求开展声发射监测。由于声发射监测能在早期发现焊缝在水压力作用下的缺陷扩展过程,因而在钢岔管水压试验中也有不少工程开展了此项工作。此外,国家、能源及水利行业都制定了专门的检测规范(GB/T18182、NB/T47013.9 及 SL751)。声发射监测能预测结构中缺陷发展程度,从而避免高压状态下钢岔管爆裂。辽宁清原抽水蓄能电站 1#钢岔管因未采用声发射监测,在 5.5MPa 时突然爆裂,是个严重的教训。此后,该电站的 3 台钢岔管增加了声发射监测,其中 3#钢岔管在 6.2MPa (设计 6.5MPa) 时终止升压,声发射起到了预警作用。浙江宁海钢岔管第一次主试验在 5.6MPa (设计值 6.25MPa) 时个别点应力超标,且多处声发射信号强烈,试验被迫终止,第二次主试验至 6MPa 时与第一次主试验一样而终止试验,两次主试验均未达到设计值。因此,将声发射监测纳入本规程是十分必要的。具体方法按相关规范执行。

声发射监测应重点关注声发射定位源信号集中分布位置及发展趋势,声发射信号强烈时,应在每级加压完成后实时研判数据的变化趋势,以决定下一步的试验程序。

6 资料整理及报告编制

6.1 试验资料整理

6.1.3 资料整理分析应包含以下内容：

1 钢岔管径向指与水流方向垂直的方向，钢岔管轴向指钢岔管顺水流方向，断面径向或轴向变形量为钢岔管某对称断面两点变形的矢量和。

2 现行残余应力测试方法标准及相关标准中没有针对钢岔管残余应力的评价方法。水利部水工金属结构质量检验测试中心靳红泽等探讨了钢岔管水压试验消除焊接残余应力效果的评价方法，提出用峰值消除率、平均消除率来评价。具体如下：

残余应力峰值消除率用 R_p 表示，按公式（6.1.3-1）计算：

$$R_p = \frac{\overline{\sigma_p} - \overline{\sigma_{p后}}}{\overline{\sigma_p}} \times 100\% \quad (6.1.3-1)$$

式中： R_p —残余应力峰值消除率；

$\overline{\sigma_p}$ —所有峰值点 σ_p 的算术平均值，MPa，规定水压试验前超过材料屈服强度 σ_s 的 1/2 的残余应力值为峰值；

$\overline{\sigma_{p后}}$ —所有原峰值点水压试验后对应的残余应力算术平均值，MPa。

残余应力平均消除率用 R_a 表示，按公式（6.1.3-2）计算：

$$R_a = \frac{\overline{\sigma_a} - \overline{\sigma_{a后}}}{\overline{\sigma_a}} \times 100\% \quad (6.1.3-2)$$

式中： R_a —残余应力平均消除率；

$\overline{\sigma_a}$ —残余应力平均值，MPa；

$\overline{\sigma_{a后}}$ —水压试验后的残余应力测试值，MPa。