



中国船级社

钢悬链线式立管系统安装检验指南

(初 稿)

2025 年 9 月

北京

目 录

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 第 1 章 总 则 | 1 |
| 第 1 节 一般规定 | 1 |
| 第 2 节 定义和缩写 | 2 |
| 第 3 节 接受标准 | 4 |
| 第 2 章 安装设计 | 5 |
| 第 1 节 一般规定 | 5 |
| 第 2 节 安装方案 | 5 |
| 第 3 节 安装分析 | 8 |
| 第 4 节 SCRS 提升系统 | 10 |
| 第 3 章 海上安装 | 11 |
| 第 1 节 一般规定 | 11 |
| 第 2 节 托篮结构、立管悬挂结构和提升系统的安装..... | 11 |
| 第 3 节 海上敷设与回接 | 12 |
| 第 4 节 预调试与完工调查 | 14 |
| 第 4 章 焊接和无损检测 | 15 |
| 第 1 节 一般要求 | 15 |
| 第 2 节 环焊缝全尺寸疲劳试验 | 16 |

第1章 总 则

第1节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本指南规定了钢悬链线式立管系统（以下简称“SCRS”）安装设计和海上安装的检验技术要求，为 SCRS 的设计审查和现场检验提供指导。

1.1.1.2 钢悬链线式立管系统的安装设计和海上安装应满足 CCS《海洋立管系统检验指南》和本指南的要求。

1.1.1.3 本指南适用于采用 S 型敷设方法的钢悬链线式立管系统。采用其它敷设方法（如 J 型敷设）的，可参照本指南的适用要求。

1.1.1.4 为便于服役阶段的状态监测，SCRS 可安装适当的监测和监测设备，这些设备应在安装阶段采取适当方法进行安装，不应影响 SCRS 在安装阶段和服役阶段的安全性和各个部件的功能性。

1.1.1.5 SCRS 提升系统（包括结构、起重设备及其零部件等）应经发证检验机构检验发证。

1.1.2 SCRS 安装

1.1.2.1 SCRS 可采用预安装和后安装的方式进行安装。

1.1.2.2 SCRS 海上安装一般包括 SCRS 敷设、SCRS 回接、SCRS 预调试等正常操作和弃管回收等应急操作。

1.1.2.3 SCRS 敷设一般包括起始敷设、正常敷设、挠性接头连接、挠性接头下放（采用预安装方法时）等阶段。

（1）SCRS 起始敷设阶段系指从启动敷设作业至正常敷设的过程。

（2）SCRS 正常敷设阶段系指从 SCRS 达到正常敷设形态至完成连接并达到设计长度的过程，不包括连接挠性接头。

（3）挠性接头连接阶段系指 SCRS 敷设至设计长度后，将挠性接头组件转移至焊接作业线并完成在线连接的过程。

（4）挠性接头下放阶段系指在采用预安装方式时，将连接了挠性接头的 SCRS 沿着设计路由下放至海床进行湿式保存的过程。

1.1.2.4 SCRS 回接一般包括 SCRS 回收（采用预安装方式时）、SCRS 横移和 SCRS 拉入悬挂等阶段。

（1）SCRS 回收阶段系指采用预安装方式时，将位于海底湿存区的连接了挠性接头的 SCRS 回收至水面船舶的过程。

（2）SCRS 横移阶段系指将连接了挠性接头的 SCRS 从水面船舶横移至浮动设施的过程。

（3）SCRS 拉入悬挂阶段系指将连接了挠性接头的 SCRS 拉入并悬挂至浮动设施托篮结构的过程。

1.1.2.5 SCRS 预调试包括预吹扫、充水、吹扫、清管、测径和水压试验、注水（如适用）、脱水和干燥（如适用）。

1.1.2.6 考虑涡激振动、腐蚀、保温、防海生物等的要求，SCRS 海上安装还应包括涡激振动抑制装置（如螺旋列板）、阳极和外防腐涂层、保温层、防海生物涂层等部件的安装操作。

第 2 节 定义和缩写

1.2.1 定义

1.2.1.1 本指南中所用定义如下：

(1) 钢悬链线式立管

系指以悬链线形状连接至浮动设施的钢质立管，可看作海底管道的延长段。钢悬链线式立管可用于生产、外输、输入和注入用途。

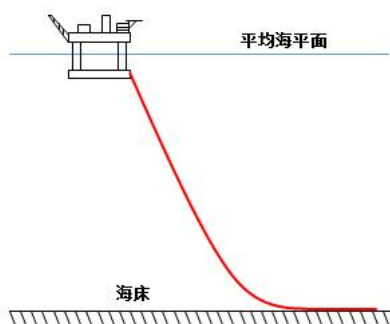


图 1.2.1.1 典型钢悬链线式立管构型示意图

(2) 钢悬链线式立管系统

系指自立管顶部接头的托篮结构至海底与海底管道/PLET（海底管道终端）/PLEM（海底管道终端管汇）连接处之间的所有部件。

(3) 立管管子

系指构成立管单根的主要通道的管子。

(4) 管节

系指由两根钢管焊接形成一根完整的管节。通常用于钢悬链线式立管和混合立管中焊接的垂直钢管段。

(5) 挠性接头

系指由钢材和合成橡胶制成的总成，可允许一定程度的相对转动，以减小立管端部弯矩。

(6) 立管悬挂结构

系指焊接在浮箱或类似浮体结构上，用于连接钢悬链线式立管的托篮结构并将立管载荷传递至浮体的最外延结构部分。

(7) 托篮结构

系指钢悬链线式立管顶部挠性接头的接收结构，通常焊接至浮体上的立管悬挂结构上。

(8) 现场节点涂层

系指保护环焊缝处的单层或多层涂层。现场节点涂层可以是海上现场涂敷，也可以是在工厂内涂敷。

(9) 正常操作

系指按计划使用的设备或系统的状态，包括稳定流状态和日常运行中可能发生的计划关

闭。

(10) 止返点

系指完成 SCR 弃管作业而铺管船不会与浮动设施发生干涉的最终敷设位置点。

(11) SCRS提升系统

系指安装在浮动设施上,用于引导和提升 SCRS 至舷侧托篮结构并完成对中和就位的专用系统。一般包括以下组成部分:

- ① 主体结构;
- ② 绞车,包括主提升绞车、导向绞车等;
- ③ 索具,包括主提升索具、导向索具等;
- ④ 导向滑轮及其支撑结构等;
- ⑤ 控制系统、动力单元及其他部件。

(12) 环焊缝全尺寸疲劳试验

系指采用直径、壁厚等关键特征尺寸与产品一致的试样进行的用于测试管道环焊缝疲劳性能的试验。

(13) SCRS预安装

系指铺管船将SCRS预先敷设在路由上,在浮动设施就位之后通过专用船舶将立管从海底提升至预定位置,最后由浮动设施上的SCR提升系统将立管悬挂就位。

(14) SCRS后安装

系指浮动设施安装就位之后,由铺管船敷设SCRS,敷设至浮动设施后将立管悬挂就位。

1.2.2 缩写

1.2.2.1 本指南中所用缩写如下:

| 序号 | 缩写 | 中文名称 |
|----|-------|------------|
| 1 | SCRS | 钢悬链线式立管系统 |
| 2 | SCR | 钢悬链线式立管 |
| 3 | PLEM | 海底管道终端管汇 |
| 4 | PLET | 海底管道终端 |
| 5 | VIV | 涡激振动 |
| 6 | HAZID | 危险源辨识 |
| 7 | HAZOP | 危险源和可操作性分析 |
| 8 | ROV | 遥控无人潜水器 |
| 9 | A&R | 弃管和回收 |
| 10 | RAO | 运动响应算子 |
| 11 | FAT | 工厂接受试验 |
| 12 | SIT | 系统集成试验 |
| 13 | DMA | 重力锚 |
| 14 | GPS | 全球定位系统 |
| 15 | WPS | 焊接工艺程序 |
| 16 | PQR | 工艺评定记录 |
| 17 | MTR | 工厂试验报告 |
| 18 | ECA | 工程临界评估 |
| 19 | AUT | 自动超声检测 |

| 序号 | 缩写 | 中文名称 |
|----|------|---------|
| 20 | PAUT | 相控阵超声检测 |
| 21 | CVN | 夏比V型缺口 |
| 22 | UT | 手动超声检测 |
| 23 | VT | 外观检查 |
| 24 | NDT | 无损检测 |
| 25 | MT | 磁粉检测 |
| 26 | PT | 渗透检测 |
| 27 | RT | 射线检测 |
| 28 | ITP | 检验和试验计划 |

第 3 节 接受标准

1.3.1 一般要求

1.3.1.1 除满足本指南要求外，对于 SCRS 的海上安装，本社承认国际标准、国外先进标准、国家标准和行业标准的适用部分。

1.3.1.2 如采用其它标准替代本指南所列接受的标准时，则应证明该替代标准与承认的标准具有同等的安全水准，并经本社评估和同意后方可使用。

1.3.1.3 任何与设计标准之间的不一致，以及对设计标准要求的免除及更改均应在设计文件中明文说明，并经业主和本社同意。

1.3.1.4 应采用设计合同生效之日时最新版本的标准，否则应在合同中予以明确规定。

1.3.2 接受的标准

1.3.2.1 本社接受的立管系统主要相关标准如下：

| 序号 | 标准号 | 标准名称 |
|----|--------------|---|
| 1 | API RP 2RD | Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs) |
| 2 | API Std 2RD | Dynamic Risers for Floating Production Systems |
| 3 | API Std 1104 | Welding of Pipelines and Related Facilities |
| 4 | API RP 1111 | Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design) |
| 5 | BS 7608 | Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures |
| 6 | BS 7910 | Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures |

第2章 安装设计

第1节 一般规定

2.1.1 一般要求

2.1.1.1 应在SCRS安装作业前完成安装设计，制定安装方案，通过安装分析确定作业窗口期，并将安装设计文件提交我社批准。

2.1.1.2 针对SCRS安装作业期间的紧急情况，应进行弃管/回收分析，并制定应急程序。

2.1.1.3 SCRS的钢管、管节、部件和组装件在运输过程中的存放和固定方式应避免其受到机械损伤和腐蚀。装船固定和运输时应考虑船舶运动的影响。

2.1.1.4 SCRS的钢管、管节、部件、组装件和吊装索具及其连接应具有足够的强度，以确保吊装作业的安全。

2.1.1.5 如浮动设施设有SCRS提升系统，应满足本章第4节的要求。

2.1.1.6 需提交我社批准的SCRS安装文件包括但不限于：

- (1) 安装规格书；
- (2) 安装方案，包括SCRS敷设（焊接和无损检测、现场节点涂敷、VIV（涡激振动）抑制装置安装、阳极安装等）、SCRS回接、SCRS预调试、应急程序等；
- (3) 安装分析报告，包括紧急情况下的分析；
- (4) SCRS提升系统详细图纸和计算报告（如适用）。

第2节 安装方案

2.2.1 一般要求

2.2.1.1 SCRS安装方案通常应明确以下要求：

- (1) 安装各阶段的分步操作程序，包括应急程序；
- (2) 安装各阶段的限制作业海况；
- (3) SCRS的检验试验计划和要求。

2.2.1.2 SCRS安装方案中应考虑安装作业对水下结构（如PLET）产生的影响。

2.2.1.3 SCRS安装方案中应考虑S型敷设方法和错边等原因导致并积累的管道扭矩，并采取措施予以消除。

2.2.1.4 宜采用HAZID（危险源辨识）/HAZOP（危险源和可操作性分析）方法对安装程序进行风险评估。

2.2.2 敷设前准备

2.2.2.1 根据选定的SCRS安装方法选择安装辅助设备，如起始锚、湿存区垫层等。如采用分体式PLET，在敷设开始前安装PLET防沉板。

2.2.2.2 采用起始锚法时，应在敷设开始前安装起始锚及索具。起始锚及索具应具备足够的强度，以便固定SCR起始段。

2.2.2.3 采用预安装方式时，在湿存位置应提前设置垫层等保护措施，以便挠性接头完好保存且便于识别和回收。

2.2.2.4 安装辅助设备和PLET防沉板的安装坐标和方向应符合安装公差要求。应采取适当措施对安装后的辅助设备和PLET防沉板进行准确定位。

2.2.2.5 安装辅助设备和PLET防沉板安装完成后，宜进行完工调查，确认其完工状态符合使用要求。

2.2.3 SCRS 起始敷设

2.2.3.1 SCRS起始敷设开始前，应进行敷设前调查，确认安装辅助设备及其索具、PLET

防沉板（如适用）等的位置和状态符合要求，路由具备敷设条件。

2.2.3.2 铺管船根据程序要求就位，吊装、焊接、无损检测和涂敷等设备应完成调试并确认可用。托管架、张紧器和滚轮等应调整至设计状态。

2.2.3.3 SCRS起始敷设工序通常包括：

(1) 焊接作业线在线连接，包括起始头安装、管节焊接、无损检测、现场节点涂敷、阳极安装、VIV抑制装置安装（如有时）等；

(2) 张紧器向船尾移动SCRS；

(3) SCRS沿着托管架入水，持续下放；

(4) 起始头靠近并连接起始锚；

(5) SCRS在海床上着陆并持续敷设；

(6) SCRS形成S型构型，调整张紧器至正常敷设张力。

2.2.3.4 当PLET作为SCRS敷设起始端，起始敷设工序通常包括：

(1) PLET进入焊接作业线、零部件安装（如注水帽、浮筒等）、焊接作业线在线连接；

(2) 张紧器向船尾移动SCRS；

(3) PLET沿着托管架入水，持续下放；

(4) PLET靠近并连接起始锚；

(5) PLET着陆和锁定；

(6) SCRS在海床上着陆并持续敷设；

(7) SCRS形成S型构型，调整张紧器至正常敷设张力。

2.2.3.5 应评估PLET承压部分由于重心过高导致在下放过程中引起立管扭转的风险，必要时应采取防扭转措施，措施的有效性应通过计算分析确定。锁定装置应能将承压部分有效锁定在防沉板上。

2.2.3.6 SCRS起始敷设过程中，应持续监测托管架尖端间隙、下弯段状态、SCRS的扭转等。

2.2.3.7 当PLET作为SCRS敷设起始端，还应监测PLET及索具通过托管架的状态、PLET处于下弯段的状态、PLET着陆状态、PLET倾倒导致的立管扭转等，避免发生碰撞或过度变形。

2.2.3.8 SCRS起始敷设完成后，应进行完工调查，确认SCRS起始敷设段符合安装公差要求。

2.2.4 SCRS 正常敷设

2.2.4.1 如SCRS正常敷设与起始敷设预调查相隔时间较远，宜再次进行敷设前调查，确认SCRS路由具备敷设条件。

2.2.4.2 SCRS正常敷设工序通常包括：

(1) 双节点管预制（如有时）；

(2) 焊接作业线在线连接，包括管节焊接、无损检测、现场节点涂敷、阳极安装、VIV抑制装置安装（如有时）、防海生物涂层安装（如有时）等；

(3) 张紧器向船尾移动SCRS；

(4) 持续下放SCRS。

2.2.4.3 SCRS正常敷设段应符合安装公差要求，如SCRS长度、SCRS方向（包括与PLET方向的偏差）、SCRS侧向位置、触地点位置、VIV抑制装置起止点、防海生物段起止点等。

2.2.5 挠性接头连接和下放

2.2.5.1 应采取措施对挠性接头进行保护，以避免其通过托管架或在海床上湿式保存时发生损坏。

2.2.5.2 挠性接头连接和下放工序通常包括：

(1) 挠性接头在线连接，包括焊接、无损检测、现场节点涂敷、法兰背密封试验、挠性接头组装件拆装、拖拉头安装、索具连接（如A&R（弃管和回收）缆）和张力的转换等；

(2) 挠性接头下放，包括挠性接头通过托管架、持续下放和在湿存垫层着陆等。

2.2.5.3 湿式保存不应影响防腐涂层、VIV抑制装置、阳极、保温层和防海生物涂层等

的完整性和功能。

2.2.6 SCRS 回收

2.2.6.1 SCRS回收作业开始前，宜进行现状调查，确认SCRS、挠性接头组装件、拖拉头和索具等可进行回收作业。

2.2.6.2 SCRS回收工序通常包括：

- (1) 回收缆下放并连接至拖拉头；
- (2) 通过铺管船绞车对回收缆进行回收，并通过移船将SCRS提升至铺管船；
- (3) 拆除挠性接头组装件，检查挠性接头状态。

2.2.7 SCRS 横移

2.2.7.1 SCRS横移工序通常包括：

- (1) 横移缆及辅助工具安装；
- (2) 横移缆回收至铺管船并与拖拉头连接；
- (3) SCRS下放至指定深度，张力逐渐转换至横移缆；

2.2.7.2 SCRS横移过程中，横移缆、回收缆等索具之间不应发生干涉，索具与浮动设施、铺管船之间不应发生干涉。

2.2.7.3 SCRS横移过程中，挠性接头的旋转不应超过最大允许角度。

2.2.8 SCRS 拉入悬挂

2.2.8.1 SCRS拉入悬挂过程中，横移缆、回收缆、拉入缆和导向缆等索具之间不应发生干涉，索具与浮动设施、铺管船之间不应发生干涉，SCRS不应与任何结构发生碰撞。

2.2.8.2 SCRS拉入悬挂工序通常包括：

- (1) 提升缆与挠性接头顶部的拖拉头进行水下连接；
- (2) 回收提升缆至拉入深度；
- (3) 横移缆张力完全转换至提升缆后，解除横移缆与拖拉头连接并移除横移工具；
- (4) 在拉入深度下，连接拉入缆至挠性接头顶部的拖拉头；
- (5) 继续回收提升缆至指定深度后，将提升缆张力转换至拉入缆；
- (6) 连接导向缆至挠性接头顶部的拖拉头；
- (7) 拉入缆和导向缆配合完成挠性接头与托篮结构对中并就位，完成悬挂。

2.2.8.3 SCRS拉入悬挂过程中，挠性接头的旋转不应超过最大允许角度。

2.2.9 SCRS 预调试

2.2.9.1 SCRS预调试工序通常包括：

- (1) 预调试辅助设备准备工作，如拆卸注水帽、安装PLET端/挠性接头端收发球筒等；
- (2) 充水、通球和测径；
- (3) 水压试验；
- (4) 脱水干燥。

SCR预调试包括预吹扫、充水、吹扫、清管、测径和水压试验、注水（如适用）、脱水和干燥（如适用）。

2.2.10 应急程序

2.2.10.1 在SCRS安装过程中应持续监测天气（包括预报）、设备参数和SCR状态，出现以下紧急情况时应启动应急程序：

- (1) 恶劣天气；
- (2) 设备失效，如船舶设备失效、安装设备失效和浮筒扶正失效；
- (3) SCR损坏，如屈曲。

2.2.10.2 当出现恶劣天气时，根据天气恶劣程度选择低速敷设、原地待机、部分弃管或完全弃管。当天气恢复正常后，对SCRS回收并检查满意后恢复作业。

2.2.10.3 当设备失效时，应立即暂停作业，检查并评估设备失效情况，根据评估结果

选择原地待机、弃管回收等应急措施，待设备修理完成后，对 SCRS 状态进行检查，满意后恢复作业。

2.2.10.4 当 SCR 损坏时，应采取的应急程序包括：

- (1) 暂停作业；
- (2) 检查并确认 SCR 损坏情况；
- (3) 开展应急评估，根据评估结果采取如下措施：
 - ① 铺管船将 SCR 直接回收至焊接作业线，切除损伤段，替换为完好管段；
 - ② 铺管船将 SCR 弃置到海床上，ROV（遥控无人潜水器）切除损伤段，将 SCR 回收至焊接作业线，在作业线上替换为完好管段。
- (4) 恢复作业。

2.2.10.5 铺管船低速敷设或原地待机，持续时间应不超过疲劳分析确定的允许值。

2.2.10.6 在起始敷设的开始阶段，回收 SCRS 至铺管船可作为应急响应措施。

2.2.10.7 当 PLET 倾倒时，可将 PLET 回收至铺管船进行回正，或由辅助船绞车连接 PLET 并提供额外的扶正力，必要时可同时采用以上两种措施。

2.2.10.8 当 SCRS 已与起始锚连接，但分体式 PLET 承压部分未完成就位时，可将 PLET 承压部分放置在防沉板附近的海床上，并与水下结构保持安全距离。

2.2.10.9 SCRS 横移阶段出现恶劣天气或设备故障时，在保证安全的前提下完成横移作业，断开 A&R 缆，将 SCR 悬挂在浮动设施上，暂停作业至天气改善或设备修复完毕。

2.2.10.10 SCRS 拉入悬挂阶段出现恶劣天气或设备故障时，将 SCRS 从拉入系统转换至铺管船上专用设备，并实时监测挠性接头旋转情况，避免过度旋转，必要时可再次安装挠性接头组装件，暂停作业至天气改善或设备修复完毕。

2.2.10.11 对于后安装方式：

- (1) SCRS 敷设至止返点之前的应急程序宜按本章 2.2.10.2 至 2.2.10.8 进行；
- (2) SCRS 敷设至止返点之后出现紧急情况时：
 - ① 宜尽快完成后续安装；
 - ② 部分弃管并原地待机；
 - ③ 将管道回收至止返点位置，切割后弃管。

第 3 节 安装分析

2.3.1 一般要求

2.3.1.1 SCRS 的安装分析应：

- (1) 校核立管的应力、应变和疲劳，满足本节 2.3.2 的要求；
- (2) 确定限制作业海况；
- (3) 为安装作业提供详细操作流程；
- (4) 校核安装设备和辅助工具的工作载荷；
- (5) 确定作业期间需监测的参数。

2.3.1.2 安装分析应至少包括静态分析、动态分析和疲劳分析，对显著影响计算结果的参数还应进行敏感性分析。

2.3.1.3 安装分析应覆盖 SCRS 敷设、SCRS 回接、SCRS 预调试等正常操作，以及弃置/回收等应急操作。

2.3.1.4 安装分析应按照作业工序对起始敷设、挠性接头下放和回收、弃置和回收等阶段进行逐步分析。

2.3.2 接受衡准

2.3.2.1 SCR 的纵向载荷设计（LLD）、组合载荷设计（CLD）和局部屈曲设计（LBD）应满足我社《海底管道系统规范》3.6.2、3.6.3 和 3.6.5 的要求。

2.3.2.2 SCR 的上弯段和下弯段还应满足我社《海底管道系统规范》3.10.3.2 的要求。

2.3.2.3 SCR 在安装期间的累积疲劳损伤通常不应超过总允许疲劳损伤的 10%，疲劳安

全系数宜取10。

2.3.2.4 铺管船安装设备，如张紧器、A&R绞车等结构承受的载荷不应超过其承载力。

2.3.2.5 铺管船和托管架上滚轮承受的载荷不应超过其承载力。

2.3.2.6 托管架尖端与管道之间应有足够间隙。

2.3.2.7 铺管船、浮动设施、立管和缆绳之间保持足够的安全距离，避免发生干涉和碰撞。

2.3.2.8 SCR底部张力不应超过重力锚等辅助设备的承载力。

2.3.2.9 SCR横移和拉入悬挂过程中，浮动设施上吊机、绞车等承受的载荷不应超过其承载力。

2.3.3 静态分析方法

2.3.3.1 静态分析用于确定 SCRS 敷设静态构型及敷设参数，包括偏移距离、铺管船位置、触地点位置、托管架姿态、滚轮位置和张紧器张力等。对于 S 型敷设方法，偏移距离为铺管船船尾量至触地点的水平距离。

2.3.3.2 静态分析应包括空管和进水两种工况。

2.3.3.3 静态分析应覆盖 SCRS 设计路由上的最大和最小水深。

2.3.3.4 静态分析的载荷仅考虑重力、浮力等功能载荷，不考虑海流、波浪等环境载荷和铺管船运动。

2.3.3.5 对于张紧器张力、铺管船位置偏移和 SCRS 重量等重要参数，宜进行敏感性分析。

2.3.4 动态分析方法

2.3.4.1 动态分析用于确定满足本节 2.3.2 接受衡准的最大作业海况。

2.3.4.2 动态分析应包括空管和进水两种情况。

2.3.4.3 动态分析应考虑沿设计路由的最大水深和最小水深，对于起始敷设可采用所在位置的水深。

2.3.4.4 宜采用 1 年重现期的波浪和海流数据为基准进行计算，通过动态分析确定允许的最大作业海况。

2.3.4.5 动态分析使用的波浪周期应能覆盖安装地点的波浪特征。

2.3.4.6 动态分析的各个海况可假设为波流同向，相邻海况间的间隔不宜大于 30°。

2.3.4.7 通常可采用规则波方法进行波浪模拟，也可以采用随机波方法（如 JONSWAP 谱）进行模拟。如采用规则波方法时应采用最大波高。

2.3.4.8 动态分析可采用静态分析确定的 SCRS 静态敷设构型或考虑铺管船最大偏移后的构型进行计算。

2.3.4.9 动态分析中的船舶运动可采用 RAO（运动响应算子）方法模拟。

2.3.4.10 动态分析应根据不同海况选择合适的水动力系数。海床土体刚度、摩擦系数等可采用在位分析中的参数。

2.3.4.11 宜对波浪谱、张紧器张力、SCRS 重量、海流方向和水动力系数等重要参数进行敏感性分析，以评估相关参数的偏差对动态分析结果的影响。

2.3.4.12 如 SCRS 安装了螺旋列板，宜分别计算螺旋列板安装前后的最大作业海况。

2.3.5 疲劳分析方法

2.3.5.1 疲劳分析根据 SCR 安装过程中的海况条件、待机时间和敷设速度，计算 SCR 累计疲劳损伤。

2.3.5.2 疲劳分析应采用我社《海洋立管系统检验指南》6.3.2 的方法。

2.3.5.3 疲劳分析可主要考虑由动态分析确定的关键海况下的波致疲劳。水深应选取设计路由的最大水深。

2.3.5.4 疲劳分析可采用的静态分析确定的 SCRS 构型。

2.3.5.5 疲劳分析应根据不同海况选择合适的水动力系数。海床土体刚度、摩擦系数等可采用在位分析中的参数。

2.3.5.6 宜对海流、波浪谱、张力等重要参数进行敏感性分析，以评估相关参数的偏差对疲劳分析结果的影响。

2.3.6 弃管回收分析

2.3.6.1 应进行 SCRS 敷设过程中的弃管回收分析，验证 SCR 的结构完整性及安装设备能力。

2.3.6.2 弃管和回收分析应覆盖敷设路由上的最大水深和最小水深，以及在最大水深位置立管进水的情况。

2.3.6.3 应采用本节 2.3.3 和 2.3.4 规定的静态和动态方法，对弃管和回收的作业过程进行分析。

2.3.7 曲线段稳定性校核

2.3.7.1 SCRS 路由上有曲线段时，应根据曲率半径确定最大允许的底部张力，保证 SCRS 在弯曲段的稳定性。

第 4 节 SCRS 提升系统

2.4.1 一般要求

2.4.1.1 本节适用于浮动设施上的 SCRS 专用提升系统。

2.4.2 SCRS 提升系统

2.4.2.1 SCRS 提升系统应能将 SCRS 安全的提升至托篮结构处并悬挂就位。

2.4.2.2 SCRS 提升系统的设计应符合公认规范标准要求，其主体结构及其支撑结构的校核应至少考虑下列载荷最不利的组合工况：

- (1) 重力载荷，包括结构重量、设备重量、可变重量等；
- (2) 环境载荷，如风、浪等；
- (3) 作业载荷，如立管提升载荷和导向载荷等。

2.4.2.3 如多个 SCRS 共用一套提升系统，提升系统的布置和强度应满足所有立管的安装要求。

第3章 海上安装

第1节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 本章要求适用于 SCRS 的以下建造阶段，包括：

- (1) 路由预调查和准备；
- (3) SCRS 敷设；
- (4) SCRS 回接；
- (5) 敷设后调查；
- (6) 预调试；
- (7) 完工调查。

3.1.1.2 SCRS 海上安装的全部环节应按照我社批准的规格书、图纸、计算报告、程序和检验试验计划等进行，程序中应明确规定每项作业的限制条件。

3.1.1.3 用于 SCRS 海上安装的铺管船应具备完成相应安装作业的能力，并具有符合规定的船舶技术证书。

3.1.1.4 海上安装的全部施工环节，包括焊接、无损检测、连接、涂敷和部件安装等应由具备对应资质的人员完成，人员资质证书、设备和材料的相关证明文件应备查。

3.1.1.5 SCRS 的安装应在设计公差范围内，且不对管材、涂层、部件、水下结构和船体结构等造成损伤。

第2节 托篮结构、立管悬挂结构和提升系统的安装

3.2.1 托篮结构和立管悬挂结构的安装

3.2.1.1 托篮结构和立管悬挂结构的安装应按照经批准的安装程序进行。

3.2.1.2 托篮结构和立管悬挂结构应采用全焊透的方式安装在主船体上，与之连接的结构上可能承受厚度方向载荷的板应使用 Z 向钢。

3.2.1.3 托篮结构和立管悬挂结构的安装应满足设计要求，应确认托篮的安装位置、角度和尺寸是否符合设计公差要求。

3.2.1.4 托篮结构、立管悬挂结构、主船体之间的连接焊缝应进行无损检测（如超声波检测、磁粉检测等）。

3.2.1.5 安装过程中应注意保护托篮结构和立管悬挂结构的防腐涂层，检查防腐完整性，防腐性能应按照项目技术规格书要求进行检测。

3.2.2 SCRS 提升系统的安装

3.2.2.1 SCRS 提升系统安装前应完成 FAT（工厂接受试验）和 SIT（系统集成试验），建造和试验过程应得到我社见证。

3.2.2.2 SCRS 提升系统应进行索具的布线试验，包括将提升索具和导向索具由绞车位置引导至指定固定位置（如平台中间甲板）以及下放至 SCRS 安装开始前的指定位置（如平台浮箱水平位置）。当提升系统在海上安装至已有浮动设施时，布线试验应在提升系统装船之前完成。

3.2.2.3 已安装于浮动设施上的 SCRS 提升系统，可在浮动设施拖航之前或浮动设施抵达作业海域后进行布线作业，将提升索具和导向索具由绞车引导至指定固定位置（如中间甲板）。

3.2.2.4 SCRS 提升系统在浮动设施拖航之前应进行固定。

3.2.2.5 SCRS 提升系统的提升设备（如绞车、吊机等）应进行作业前检查和测试。

第 3 节 海上敷设与回接

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 海上安装应符合 CCS《海底管道系统规范》第 5 章、CCS《海洋立管系统检验指南》第 9 章和本节的规定。

3.3.2 预安装

3.3.2.1 在 SCRS 敷设之前, 临时起始桩、PLET 防沉板、挠性接头垫块、锚固系统等(如有时)的预安装应符合批准的安装程序的要求。

3.3.3 DMA(重力锚)安装

3.3.3.1 DMA 的安装应按照经批准的安装程序进行。

3.3.3.2 DMA 安装前应对海底预安装位置进行调查, 并对 DMA 的外观及下放索具等进行检查。

3.3.3.3 DMA 的实际就位偏差应在允许公差范围内。

3.3.3.4 DMA 下放至预安装位置后, 应按设计要求贯入到设计深度, 并进行拉力试验, 且拉力试验结果(拉力值、位移及角度)应满足批准的安装程序要求, 若拉力试验结果不满足要求, 则需提起并重新贯入; 重新贯入后, 应再次进行拉力试验, 直至试验结果满足要求。

3.3.3.5 若 DMA 未能贯入到设计深度, 则需提起并在海管路由之上重新贯入, 直至设计深度和拉力试验结果满足批准的安装程序要求。

3.3.3.6 DMA 安装结束后, 各相关方应就 DMA 贯入深度及拉力试验相关报告进行签字确认。

3.3.4 立管锚固系统安装

3.3.4.1 立管锚固系统主要包括固定夹具、吸力桩及紧固锁链, 常见的锚固系统如图所示。

3.3.4.2 立管锚固系统应取得发证检验机构签发的产品证书。

3.3.4.3 立管锚固系统安装应按照经批准的程序进行。

3.3.4.4 固定夹具的安装

(1) 固定夹具安装前应对夹具、螺栓及背夹进行外观检查及数量核查。

(2) 固定夹具的螺栓扭矩应满足安装程序的要求。

3.3.4.5 吸力桩的安装

(1) 吸力桩安装前应进行相关的调查和检查, 主要包括水下目标安装位置有无杂物、吸力桩的外观状况、吸力桩抽吸泵及其安全阀的状况等。

(2) 吸力桩应缓慢下放并就位至允许安装公差范围内。

(3) 吸力桩一般通过自重或使用抽吸泵贯入到设计深度, 其首向、倾斜度及贯入深度均应在允许安装公差范围内, 并应在安装完成后形成报告由各相关方签字确认。

(4) 若吸力桩贯入状态未能满足设计要求, 则需回收并进行再次贯入。再次贯入的位置需由设计单位提供, 并由各相关方签字确认。

3.3.4.6 紧固锁链的安装

(1) 紧固锁链安装前应对各链节进行外观检查。

(2) 紧固锁链安装完成后的张力值应满足批准的安装程序要求, 并形成报告由各相关方签字确认。

3.3.4.7 应安装监控系统, 实时监测立管和锚固系统的状态。

3.3.5 PLET 安装

3.3.5.1 PLET 安装应按照批准的安装程序进行。

3.3.5.2 根据设计和安装需求, PLET 分为整体式、分体式和折叠式。根据海底环境(如土壤条件、水流速度等)选择合适的安装方法和固定措施。整体式 PLET 是一个完整的预制

单元，直接下放至海底安装；分体式 PLET 由多个模块组成，需要在海底进行组装；折叠式 PLET 设计紧凑，适合空间受限的场景，安装时需要展开。

3.3.5.3 安装前，应注意如下环节：

- (1) 确认 PLET 的设计符合项目要求，包括尺寸、材料和连接方式等。
- (2) 检查 PLET、安装工具、起重设备及 ROV 的状态。
- (3) 评估海底地形、土壤条件及水流情况，确保安装位置适合。

3.3.5.4 安装时，应注意如下环节：

(1) 使用经过标定的定位系统（如声纳或 GPS（全球定位系统）），将 PLET 精确下放至目标位置，使 PLET 与海底管道对齐。

(2) 调整 PLET 的位置和水平度，使 PLET 与海底泥面贴合。

(3) 检查 PLET 的稳定性，必要时通过灌浆或使用固定装置加固。

3.3.5.5 PLET 与海底管道连接完成后应进行压力试验，以保证连接处的密封性及系统的可靠性，并形成报告由各相关方签字确认。

3.3.5.6 应安装传感器实时监测 PLET 的运行状态，如压力、温度和振动等。

3.3.6 SCRS 敷设

3.3.6.1 管道的起始敷设应使用抗力足够的起始桩或起始锚，以确保作业安全。

3.3.6.2 挠性接头、VIV 抑制装置等的安装应符合规格书和批准的安装程序要求。

3.3.6.3 VIV 抑制装置的安装不应损坏立管涂层，不应造成影响 VIV 抑制效率的 VIV 抑制装置损坏或变形。

3.3.6.4 VIV 抑制装置安装前应确定标准 VIV 抑制装置的开始安装位置和安装数量，以及抗海生物 VIV 抑制装置的开始安装位置和安装数量。

3.3.6.5 SCRS 敷设过程中，应至少对以下进行持续监测：

- (1) S 型敷设的托管架角度；
- (2) J 型敷设的管道倾角；
- (3) 张紧器的动态张力；
- (4) 托管架端部的管道状态（采用水下摄像机）；
- (5) 上弯段及着泥点的 SCRS 状态（采用 ROV）
- (6) SCRS 的几何形状。

3.3.6.6 SCRS 状态监测系统的安装不应损坏 SCR 涂层的完整性。

3.3.6.7 现场节点涂敷应按照批准的涂敷程序进行施工，并根据检验和试验计划（ITP）进行生产检验。

3.3.7 SCRS 回接

3.3.7.1 在 SCRS 敷设至止返点之前，浮动设施应完成提升系统的准备工作，包括按程序对 SCRS 提升系统进行布线并将索具下放至提升作业开始前的指定位置（如浮箱处）。

3.3.7.2 SCRS 回接作业应符合批准的回接程序的要求。

3.3.7.3 SCRS 回接过程中应保持对缆索张力、SCRS 位置、水下操作等持续监测，避免载荷超过设计值或发生干涉。

3.3.7.4 SCRS 回接作业应满足相应的天气限制条件要求。

3.3.7.5 所有潜水作业应按照批准的的程序进行。

3.3.7.6 如需要，SCRS 在由工程船转移至浮动设施提升系统之前，浮动设施应完成计划的倾斜操作。

3.3.7.7 SCRS 预安装和回接应在允许设计公差范围内。

3.3.7.8 应保证托篮结构与 SCRS 的接触面及间隙符合设计要求，避免立管在托篮内产生过大的局部应力。

3.3.8 敷设后调查

3.3.8.1 应对 SCRS 进行敷设后调查。敷设后调查可采用在敷设管道期间连续监测着泥点的方法，也可采用单独的后调查方法。

第 4 节 预调试与完工调查

3.4.1 预调试

3.4.1.1 SCRS 的挠性接头总成安装于托篮结构之后，应对 SCRS 进行预调试。调试程序应经我社批准。

3.4.1.2 预调试应包括预吹扫、充水、吹扫、清管、测径和水压试验、注水（如适用）、脱水和干燥（如适用）等环节，应对每个环节的施工过程和结果进行记录。

3.4.1.3 预调试阶段使用的介质不应应对管道结构和内部环境造成损伤或污染。

3.4.1.4 SCRS 压力试验采用的压力值应不小于规格书要求的试验压力，保压时间不低于 8 小时。

3.4.2 完工调查

3.4.2.1 SCRS 安装完成后应进行完工调查，以确认其符合安装公差的要求。完工调查应给出整个 SCRS 的位置及状况，包括 SCRS 顶部角度、SCRS 长度和方向角、着泥点位置、PLET 位置、涂层状况、VIV 抑制装置状况、挠性接头状况、牺牲阳极状况及监测系统状况等，确认立管系统的最终状态符合设计要求，出具后调查报告并由各相关方签字确认。

3.4.3 完工文件

3.4.3.1 立管系统海上安装阶段的完工文件包括但不限于：

- (1) SCRS 关键图纸；
- (2) 全部程序文件和评定试验报告；
- (3) 检验和试验计划及其相关报告；
- (4) WPS（焊接工艺程序）和焊接记录；
- (5) 无损检测程序和检测报告；
- (6) 焊工资质和无损检测人员资质；
- (7) 预调试报告，包括系统压力试验报告；
- (8) 后调查报告和图纸；
- (9) 完工数据簿；
- (10) 异常项记录。

第 4 章 焊接和无损检测

第 1 节 一般要求

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 本章适用于 SCRS 海上建造阶段（含组装件陆上预制和海上安装）的所有焊接作业及其工艺评定。

4.1.1.2 SCRS 海上建造阶段的焊工与设备、焊接材料、焊接工艺及工艺评定、生产焊接的焊接要求，应符合本指南以及 CCS《海底管道系统规范》或 API 1104 等公认标准的要求。根据业主要求可采用更严格的控制衡准。

4.1.1.3 焊接应由具备资质的焊工按已评定的 WPS 进行。

4.1.1.4 钢管应按正确形状开坡口，并进行检查，保证在允许范围内。焊接前应确认对中情况、根部间隙和纵焊缝（如采用直缝焊管时）的相对位置。

4.1.1.5 海上安装阶段的焊接应按照焊接工艺进行，焊接工艺应经过评定，评定中应包括环焊缝疲劳性能和断裂韧性性能。

4.1.1.6 SCR 管子之间的焊接不允许进行修补。如生产焊缝经无损检测为不可接受，应切除原焊缝，重新加工坡口和焊接。

4.1.1.7 如 SCR 焊缝缺陷超出允许值，在得到业主、设计方和我社的认可后，可采用 ECA（工程临界评估）所确定缺陷接受值。

4.1.2 PQR（工艺评定记录）

4.1.2.1 PQR 的焊接应采用与海上焊接相似的作业条件以及相同型号的焊接设备进行试验焊缝的焊接。PQR 的试验焊缝质量应可代表实际生产焊接的质量。

4.1.2.2 PQR 应采用与生产焊缝相同的无损检测程序和验收标准进行检测。如果允许的焊缝缺陷尺寸是基于 ECA 方法确定，则无损检测宜采用 AUT（自动超声检测）或 PAUT（相控阵超声检测）方法。

4.1.2.3 PQR 的焊缝不能进行修补。

4.1.2.4 SCR 环焊缝的 PQR 试验包括拉伸试验、弯曲试验、CVN（夏比 V 型缺口）试验、宏观检查、硬度试验、腐蚀试验（如适用）、化学成分分析（如适用）、断裂韧性试验（如适用）以及全尺寸疲劳试验。

4.1.3 生产焊接的设计和准备

4.1.3.1 接头设计、管端机加工和对接间隙应符合批准的 WPS 的要求。

4.1.3.2 SCR 对接焊的错边将会引起应力集中及疲劳。管口组对时应尽量减小组对后的错边量，错边量不可超出 WPS 中的允许值。SCR 管口应使用对口器进行对接焊。

4.1.3.3 应根据已批准的方法进行管端坡口的加工，最终的坡口应符合 WPS 的要求。坡口表面应进行磁粉检测，不允许出现由缺陷导致的相关磁痕。缺陷和磁痕应通过重新切削予以去掉。应提交基于统计分析的坡口磁粉检测抽样计划，否则应对坡口进行 100% 的磁粉检测。对于其他非磁性材质应进行渗透检测或其他等效的检测方法。

4.1.3.4 对于 SCR 疲劳关键区域的焊缝应进行磨平处理，焊缝的余高、表面质量、母材和焊缝的局部厚度、表面粗糙度等均应满足设计规范标准和批准的 WPS 要求。疲劳关键区域的焊缝几何形状会显著影响疲劳性能，应对表面粗糙度和表面打磨不平整度进行 100% 的目视检查。

4.1.4 无损检测

4.1.4.1 本节适用于 SCRS 建造阶段（组装件预制和海上安装）焊接接头的无损检测。

4.1.4.2 无损检测应由具备资质的人员按已评定的无损检测程序进行。

- 4.1.4.3 在进行无损检测之前，应对焊接接头进行外观检查。
- 4.1.4.4 无损检测应在最终热处理状态之后进行。
- 4.1.4.5 对于承受疲劳载荷的环焊缝，宜采用 UT（手动超声检测）对焊根区域进行检测。
- 4.1.4.6 所有焊缝应进行 100%外观检查（VT），以及下列任意一种 NDT（无损检测）方法：
- (1) 100%AUT；
 - (2) 100%(UT+MT（磁粉检测）)或 100%(UT+PT（渗透检测）)（对非铁磁性材料）；
 - (3) 100%RT（射线检测）；
 - (4) 100%PAUT。
- 4.1.4.7 下列情况下，应采用 AUT 或 PAUT：
- (1) 壁厚大于 25mm 的焊接；
 - (2) 允许缺陷尺寸基于 ECA 的焊缝。
- 4.1.4.8 如果采用 RT 作为主要的 NDT 方法，则在下列情况下宜采用 UT 或 AUT 或 PAUT 进行补充检测：
- (1) 当开始安装或中断后恢复焊接时，对前 10 个焊缝进行补充检测；如果检测出了 RT 未能检测到的缺陷，对接下来的 10 个焊缝再进行补充检测，如这 10 个焊缝的检测仍不能令人满意，应中止焊接，直到查出造成缺陷的原因并予以改正为止；
 - (2) 对沟槽缺陷进行补充检测。
- 对于黄金焊缝（重要的焊缝，如未参与系统压力试验的对接焊缝），应采用 100%（UT+RT+MT）或 100%（UT+RT+PT）（非铁磁性材料）。如采用 AUT 或 PAUT，则可协议略去 UT 和 RT。
- 4.1.4.9 无损检测的验收标准应符合 CCS《海底管道系统规范》或 API 1104 或等效标准的要求，也可根据断裂力学分析结果确定。

第 2 节 环焊缝全尺寸疲劳试验

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 本节适用于 SCR 的环焊缝全尺寸共振弯曲疲劳试验，其他刚性管状试件的弯曲疲劳试验也可参照本节的适用要求执行。

4.2.1.2 承受动态载荷的环焊缝应满足以下要求：

- (1) 要求的焊接性能与焊接工艺质量一致；
- (2) 该焊接工艺在先前已针对疲劳性能进行了工艺评定，有完整的文件记录并被业主和 CCS 接受，作为对预期用途的等效文件。

4.2.1.3 如不满足本节 4.2.1.2 的要求，在得到业主和我社认可后，应通过全尺寸疲劳试验进行验证。

4.2.1.4 应对每种不同类型的焊缝进行试验验证。如果两个焊缝在以下方面存在差异，则应视为不同类型：

- (1) 焊接规格书中焊接工艺主要参数的变更；
- (2) 管端镗孔或未镗孔；
- (3) 焊缝表面打磨或不打磨。

4.2.1.5 根据选用的安装方法（S 型铺管法、J 型铺管法），疲劳试验应至少包括以下适用的 SCR 环焊缝：

- (1) 陆上预制时的管子与管子之间的环焊缝、管子与锻造件之间的环焊缝；
- (2) 海上安装时的管子与管子之间的环焊缝、管子与锻造件之间的环焊缝。

4.2.1.6 试验前，应制定环焊缝全尺寸疲劳试验规格书和试验程序，并提交 CCS 审查。

4.2.2 试件

4.2.2.1 试件的材料及成型方法、焊缝形式、焊接工艺等应和产品一致。

4.2.2.2 试件的直径、壁厚等关键特征尺寸应与产品一致。

4.2.2.3 需加载内压时，应在试件两端设计封头，封头设计应符合 GB/T150.3 的规定。

4.2.2.4 试件长度应根据模态计算结果及试验装置参数进行设计，应考虑连接工装、试件内腔介质等对试件固有频率的影响，以确保试件的一次弯曲振动固有频率在试验装置加载频率范围内，宜低于 30Hz。

4.2.2.5 试件支撑点应选在一次弯曲共振形态时中心轴振幅为 0 的位置。

4.2.2.6 应对每个试件进行标识，保持 PQR 试验件及焊工的可追溯性，包括管道、锻件和焊材的工厂试验报告（MTR）。

4.2.3 试验焊缝

4.2.3.1 应基于环焊缝和管径确定试件的制备方案。试验焊缝应尽可能位于试件的中段部位，每个试件可包含多个试验焊缝，焊缝间距的设置应合理。

4.2.3.2 所有试验焊缝均应按生产级 SCR 焊缝的质量标准进行制作和检验。测试前，试验焊缝应依据业主要求进行 AUT，且可辅以额外的 RT 和 MT。

4.2.3.3 对每一种焊接工艺的 SCR 环焊缝应进行高、中、低共 3 组应力范围的疲劳试验。对于每一等级应力范围值应至少测试 3 组焊缝数据，3 个应力范围共至少测试 9 组数据。

4.2.3.4 所有试验焊缝在疲劳试验前后都应进行缺陷检查。试验试件的无损检测结果应充分记录，包括缺陷类型、深度、高度和宽度、表面断裂，以及特定的焊缝样品位置。无损检测报告应提供给疲劳试验实验室，以便与疲劳试验结果进行比较和记录。

4.2.4 试验载荷

4.2.4.1 SCR 全尺寸共振弯曲疲劳试验时，试件承载的交变弯曲应力随时间呈正弦规律周期性变化。

4.2.4.2 试验应力范围根据实际情况确定，试件最大应力应不高于材料屈服强度的 2/3。

4.2.4.3 对于每一种类型的焊缝，应至少在三个不同的应力范围（低、中、高）下进行试验，试件应在应力水平的±5%范围内进行测试。

4.2.4.4 应力范围应根据测试焊缝周围的平均和雨流计数计算。在疲劳试验期间，应记录每个应变计的读数，并计算每个应力范围的目标循环数。

4.2.5 循环次数

4.2.5.1 对于高应力循环载荷，宜试验至出现贯穿性裂纹。对于中、低应力循环载荷，宜至少试验至其在目标 S-N 曲线上对应的目标载荷循环次数的 1.1 倍。在计算目标载荷循环次数时应考虑试验样本数、置信率和目标 S-N 曲线的标准差等，选取的置信率应至少为 95%。

4.2.5.2 焊缝处目标载荷循环次数的确定，应基于立管内壁焊根处和外壁焊趾处对应的 S-N 曲线，分别计算相应的载荷循环次数，并取大值。S-N 曲线的选取应与设计一致，内壁焊根处宜选用 BS7608 E S-N 曲线，外壁焊趾处宜选用 BS7608 D S-N 曲线。

4.2.6 试验装置

4.2.6.1 共振弯曲疲劳试验装置一般由激振系统、数据采集存储系统、支撑装置、加压系统、控制系统等组成，其加载频率、加载水压、应变采集功能应满足试验要求。

4.2.6.2 疲劳试验装置所施弯矩的误差应在规定范围内。选择的频率应适合于材料、试件和试验机的组合。对于给定试验系列，试验频率应当相同。

4.2.6.3 试件两端的端盖应适用于进行充水、排气、加压等操作，以及与疲劳试验机所需的接口连接。端盖设计应能承受试验所采用的压力范围。

4.2.6.4 应采用应变片测量名义平均应力和应力幅。应变片应在试验焊缝的两侧并沿试件管周长等距布置，以连续监测每个焊缝的循环弯曲应力。应变片的位置使应变片处的弯曲应力和焊缝处的弯曲应力之间的差异最小。

4.2.7 试验方法

4.2.7.1 疲劳试验应处于空气中和室温的外部环境下进行，试件内腔可充液加压，压力大小宜与产品额定压力一致。

4.2.7.2 每个试件应按规定的频率（如管道试件固有频率附近）进行测试，产生规定的不同应力范围的疲劳响应。

4.2.7.3 在疲劳试验过程中，应对试件的应变、内部压力等进行监测。

4.2.7.4 如在达到规定的循环次数之前，试样出现穿透裂纹或刺漏时，认定试样失效。

4.2.7.5 当认定试件失效或达到试验要求的循环加载次数时终止试验。除非拟通过继续试验（或提高应力幅值）以确定实际焊缝可以达到的更高水平。

4.2.7.6 如果在达到目标载荷循环次数之前，其中一个焊接点出现失效，则该测试焊缝将被视为不合格。如果一个焊缝被认为是不合格的，应评估对焊接试件和焊接程序的修改，以确定原因和采取纠正措施。

4.2.7.7 试验过程因异常情况中断，如果应变范围在要求范围内，采集的加载循环次数应累计。

4.2.8 验收标准

4.2.8.1 若参与评估的所有有效试样疲劳试验循环次数高于对应的目标载荷循环次数，则判定该 SCR 的疲劳寿命满足要求。

4.2.9 试验结果处理

4.2.9.1 疲劳试验终止后，应从试件焊缝（无论是否发生损伤破坏）的中心线向左右各延伸一段等长距离，截取长度至少 160mm 的环向试样。

4.2.9.2 对于未发生损伤破坏的焊缝试件，应进行截面的磁粉检验并记录可能的缺陷。对损伤破坏的焊缝试件应在破坏部位切开进行检查及分析，以尽可能确定导致试件失效的原因。必要时进行破坏断面的显微分析、金相分析、失效分析和机械测试等。检查应包括裂纹长度、裂纹深度、壁厚、内径错边量及椭圆度的测量等。

4.2.9.3 疲劳裂纹处所施加的名义应变范围根据应变片的测量值确定。对于未失效试件，应变范围可根据每个焊缝周围所有的应变片的平均值来计算。失效试件的名义应变范围将基于疲劳裂纹起始点的应变片或两个相邻应变片之间的插值（如果初始点位于两个应变片之间）。

4.2.9.4 循环应力范围应由循环应变范围乘以假定的平面应力弹性模量来确定。对于错边引起的局部应力集中，不进行调整。

4.2.10 试验结果文件

4.2.10.1 试验完成后，应提交疲劳试验结果文件以及无损检测报告。

4.2.10.2 试验报告应包括但不限于以下内容：

- (1) 试验装置的基本信息；
- (2) 试件结构示意图、试件规格、材料；
- (3) 试验参数：加载频率、平均应力范围、试验压力、要求加载的循环次数；
- (4) 应变片分布位置和方向；
- (5) 试验循环次数；
- (6) 试件失效类型及位置；
- (7) 疲劳寿命评估图；
- (8) 试验过程照片；
- (9) 试验日期、试验操作员等。