

指导性文件  
GD016-2026



中 国 船 级 社

# 钢悬链线式立管系统 安装检验指南

**2026**

2026年7月1日生效

北 京

# 目 录

<b>第 1 章 总 则</b> .....	<b>1</b>
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
<b>第 2 章 安装设计</b> .....	<b>6</b>
第 1 节 一般规定 .....	6
第 2 节 安装分析 .....	6
第 3 节 SCRS 提升系统 .....	8
<b>第 3 章 海上安装</b> .....	<b>9</b>
第 1 节 一般规定 .....	9
第 2 节 安装方案 .....	9
第 3 节 立管悬挂结构和提升系统的安装 .....	13
第 4 节 海上敷设与回接 .....	13
第 5 节 预调试与完工调查 .....	17
第 6 节 焊接和无损检测 .....	18
<b>附录 1 环焊缝全尺寸疲劳试验</b> .....	<b>21</b>
1.1 一般规定 .....	21
1.2 试件设计与制备 .....	21
1.3 试验载荷与循环次数 .....	22
1.4 试验装置 .....	22
1.5 试验方法与验收标准 .....	22
1.6 试验结果处理与文件 .....	23

# 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”）在建造阶段中的海上安装设计及其现场检验和试验要求，包括 SCRS 提升系统的安装设计、检验和试验要求，为 SCRS 海上安装的设计审查和现场检验提供指导。

1.1.1.2 SCRS 的海上安装设计及其现场检验和试验还应满足 CCS《海洋立管系统检验指南》相关要求。

1.1.1.3 本指南适用于采用 S 型敷设方法、位于浮动设施舷侧的钢悬链线式立管系统。采用其他敷设方法（如 J 型敷设）或布置于浮动设施内部的立管系统，应遵循本指南的核心理念，可参照本指南执行。

1.1.1.4 为便于服役阶段的状态监测，SCRS 可安装监测和检测设备，这些设备应采取适当方法进行安装，安装后不应影响 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、绞车、锚机及零部件等）应取得 CCS 产品证书或检验报告。

### 1.1.2 SCRS 海上安装

1.1.2.1 SCRS 海上安装可采用预安装和后安装的方式。

1.1.2.2 SCRS 海上安装主要包括 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 敷设包括起始敷设、正常敷设、立管接头连接、立管接头下放（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，不包括立管接头连接。

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

（4）立管接头下放阶段系指在采用预安装方式时，将连接了立管接头的 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立管接头的 SCRS 回收至水面船舶的过程。

（2）SCRS 横移阶段系指将连接了立管接头的 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立管接头的 SCRS 拉入并悬挂至浮动设施托篮结构的过程。

1.1.2.5 SCRS 预调试应进行充水、清管及测径、水压试验、排水（如适用）和干燥及惰化（如适用）等操作。

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 VIV 抑制装置、牺牲阳极和外防腐涂层、保温层、防海生物涂层等部件的安装操作。

1.1.2.7 弃管回收系指在紧急情况下，铺管船将 SCRS 部分或全部弃置在海床上，并在紧急情况结束后将 SCRS 回收至铺管船，恢复安装作业的过程。

## 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。

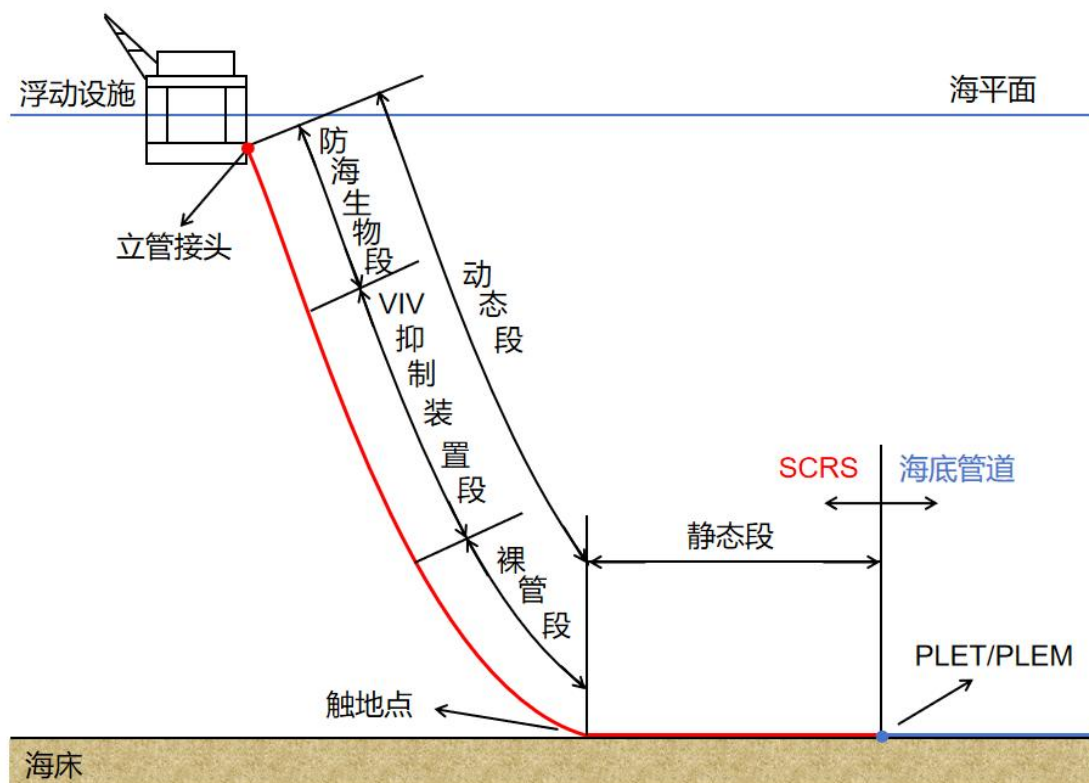


图 1.2.1.1 典型钢悬链线式立管构型示意图

#### (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/PLEM 连接处之间的所有部件。

#### (3) 管节

系指由两根钢管焊接形成的一根完整管段。

#### (4) 立管接头

立管接头系指位于立管系统端部，连接相邻管道或水下设备的过渡结构，如挠性接头和应力接头等。

#### (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) 应力接头

系指设计为变截面形式的特殊立管单根，以控制曲率和减小局部弯曲应力。

### (7) 立管悬挂结构

系指焊接在浮箱或类似浮体结构上用于将立管载荷传递至浮体的结构，包括接收连接钢悬链线式立管顶部接头的托篮结构。

### (8) VIV抑制装置

系指安装于海洋立管外表面，通过主动或被动方式干扰流体绕流形态、破坏漩涡周期性脱落规律，从而抑制或降低结构物涡激振动响应的专用装置。典型的VIV抑制装置有螺旋列板、整流罩等。

### (9) 现场节点涂层

系指保护环焊缝处的单层或多层涂层。

### (10) 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。

### (11) 止返点

系指在进行 SCRS 弃管和回收作业时铺管船不会与浮动设施发生干涉的敷设位置分界点。

### (12) SCRS提升系统

系指安装在浮动设施上，用于引导和提升 SCRS 至浮动设施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、动力单元及其它部件。

### (13) 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、焊接工艺以及检验标准等均与实际 SCRS 一致的试样进行的、用于测试立管环焊缝疲劳性能的试验。

### (14) 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 SCRS 提升系统将立管悬挂就位的过程。

### (15) SCRS后安装

系指浮动设施安装就位之后，由铺管船敷设 SCRS 至浮动设施并由浮动设施上的 SCRS 提升系统将立管悬挂就位的过程。

### (16) 起始锚

系指用于固定 SCRS 起始敷设段并为其提供抗拉能力的锚，常见的起始锚有大抓力锚、重力锚和吸力锚等。

## 1.2.2 缩写

1.2.2.1 本指南中所用缩写如下表 1.2.2.1 所示：

缩写及中英文全称对照

表 1.2.2.1

序号	缩写	英文全称	中文名称
1.	A&R	Abandonment and Recovery	弃管和回收
2.	AUT	Automated Ultrasonic Testing	自动超声检测
3.	CCS	China Classification Society	中国船级社
4.	CVN	Charpy V-notch	夏比V型缺口
5.	DMA	Deadman Anchor	重力锚
6.	ECA	Engineering Critical Assessment	工程临界评估
7.	FAT	Factory Acceptance Test	工厂接受试验
8.	GPS	Global Positioning System	全球定位系统
9.	HAZID	Hazard Identification	危险源辨识
10.	HAZOP	Hazard and Operability study	危险和可操作性分析
11.	HIC	Hydrogen induced cracking	氢致开裂
12.	ITP	Inspection and Testing Plan	检验和试验计划
13.	MT	Magnetic Particle Testing	磁粉检测
14.	NDT	Non-Destructive Testing	无损检测
15.	PAUT	Phased Array Ultrasonic Testing	相控阵超声检测
16.	PLEM	Pipeline End Manifold	海底管道终端管汇
17.	PLET	Pipeline End Termination	海底管道终端
18.	PQT	Procedure Qualification Test	工艺评定试验
19.	PQR	Procedure Qualification Record	工艺评定记录
20.	PT	Penetrant Testing	渗透检测
21.	RAO	Response Amplitude Operator	响应幅值算子
22.	ROV	Remotely Operated Vehicle	遥控无人潜水器
23.	RT	Radiographic Testing	射线检测
24.	SCRS	Steel Catenary Riser System	钢悬链线式立管系统
25.	SCR	Steel Catenary Riser	钢悬链线式立管
26.	SIT	Site Integration Test	现场集成试验
27.	SSC	Sulphide Stress Cracking	硫化物应力开裂
28.	UT	Ultrasonic Testing	超声波检测
29.	VIV	Vortex Induced Vibration	涡激振动
30.	WPS	Welding Procedure Specification	焊接工艺规程

## 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，还应满足 CCS 接受的国际标准、国内标准和行业标准的适用要求。

1.3.1.2 如采用其他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接受的标准具有同等的安全水准，并经 CCS 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免除或更改均应在设计文

件中予以说明，并经 CCS 同意。

1.3.1.4 相关文件中的条款通过本指南的引用将成为本指南的条款。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本指南。

### 1.3.2 接受的标准

1.3.2.1 CCS 接受的立管系统主要相关标准如下表 1.3.2.1 所示：

接受的标准

表 1.3.2.1

序号	标准号	标准名称
1.	API RP 2RD	浮式生产系统和张力腿平台的立管设计
2.	API Std 2RD	浮式生产系统动态立管
3.	API Std 1104	管道及附属部件焊接
4.	API RP 1111	海上油气管道设计、建造、操作和维护（极限状态设计）
5.	BS 7608	钢结构疲劳设计与评估实用规范
6.	BS 7910	金属结构裂纹验收评定方法指南
7.	GB/T150.3	压力容器 第3部分：设计
8.	CCS R025	海底管道系统规范（2021）
9.	CCS GD10-2020	海洋立管系统检验指南（2020）
10.	NACE MR0175 / ISO 15156-1	石油天然气工业 油气开采中用于含硫化氢环境的材料 第 1 部分：抗开裂材料选择的一般原则

## 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 SCRS安装作业前应完成安装设计，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CCS批准。

2.1.1.2 应根据3.2.10.1规定的SCRS安装作业期间的紧急情况，按照2.2.6要求进行弃管/回收分析，并制定相应的应急程序。

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应避免其受到机械损伤或腐蚀。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，确保吊装作业安全。

2.1.1.5 如浮动设施设有SCRS提升系统，应满足本章第3节的要求。

2.1.1.6 需提交CCS进行设计审查的SCRS安装设计文件包括但不限于：

(1) 安装规格书，包括安装方法和工艺程序说明、立管与相邻结构（如海底管道等）的连接方法和工艺程序说明、安装使用的专门作业船舶及设备说明；

(2) 设计基础；

(3) 安装流程图，包括SCRS敷设、SCRS回接、SCRS预调试、应急操作等；

(4) 安装分析报告，包括3.2.10.1规定的紧急情况下的分析；

(5) SCRS提升系统详细设计图纸和计算报告（如适用）；

(6) 立管锚固系统安装设计文件（如适用）。

### 第2节 安装分析

#### 2.2.1 一般要求

2.2.1.1 SCRS安装分析应包括：

(1) 校核立管的应力、应变和疲劳，满足本节2.2.2的要求；

(2) 确定限制作业海况；

(3) 验证安装作业详细操作流程的可行性；

(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。

2.2.1.2 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。

2.2.1.3 安装分析应覆盖SCRS敷设、SCRS回接、SCRS预调试等正常操作，以及弃管/回收等应急操作。对于起始敷设、立管接头连接和下放、SCRS回收、SCRS横移、SCRS拉入悬挂等，应按照作业工序逐步进行安装分析。对于预敷设的SCRS，应考虑其在湿式保存期间可能产生的疲劳损伤，如悬跨等。

#### 2.2.2 设计衡准

2.2.2.1 SCRS管体的纵向载荷设计、组合载荷设计和局部屈曲设计应满足CCS《海底管道系统规范》3.6.2、3.6.3和3.6.5的要求。

2.2.2.2 SCRS管体的上弯段和下弯段还应满足CCS《海底管道系统规范》3.10.3.2的要求。

2.2.2.3 SCRS管体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。

2.2.2.4 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能力。

2.2.2.5 铺管船和托管架上滚轮承受的载荷不应超过其承载能力。

2.2.2.6 托管架末端与立管之间应有足够间隙。

2.2.2.7 铺管船、浮动设施、立管和吊索具之间应保持安全距离,避免发生干涉和碰撞。

2.2.2.8 SCRS底部张力不应超过起始锚等辅助设备的承载能力。

2.2.2.9 SCR横移和拉入悬挂过程中,浮动设施上参与横移和拉入悬挂过程的相关设施(如绞车、吊机等)承受的载荷不应超过其承载能力。

2.2.2.10 安装过程中不应在SCRS上的涂层、阀门、VIV抑制装置等造成损伤,必要时应通过计算分析验证。

### 2.2.3 静态分析方法

2.2.3.1 静态分析用于确定 SCRS 静态敷设构型及敷设参数,包括偏移距离、铺管船位置、着泥点位置、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着泥点的水平距离。

2.2.3.2 静态分析应包括空管和进水两种工况。

2.2.3.3 静态分析应覆盖 SCRS 设计路由上的最大和最小水深。

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

2.2.3.5 对于张紧器张力、铺管船位置偏移、敷设角度(如适用)、SCRS 重量、安装船与浮动设施距离等重要参数,应进行敏感性分析。

### 2.2.4 动态分析方法

2.2.4.1 动态分析用于确定满足本节 2.2.2 接受衡准的最大作业海况。

2.2.4.2 动态分析应包括空管和进水两种工况。

2.2.4.3 动态分析应覆盖 SCRS 设计路由上的最大和最小水深,对于起始敷设可采用所在位置的水深。

2.2.4.4 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。

2.2.4.5 动态分析使用的波浪周期应能覆盖安装海域的波浪特征。

2.2.4.6 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°。

2.2.4.7 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。

2.2.4.8 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。

2.2.4.9 动态分析中的船舶运动可采用 RAO 方法模拟。

2.2.4.10 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。

2.2.4.11 应对张紧器张力、SCRS 重量(包括部件重量变化)、安装船与浮动设施距离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。

2.2.4.12 如 SCRS 安装了 VIV 抑制装置,宜分别计算 VIV 抑制装置安装前后的最大作业海况。

### 2.2.5 疲劳分析方法

2.2.5.1 疲劳分析根据 SCRS 安装过程中的海况条件、待机时间和敷设速度,计算 SCRS 累积疲劳损伤。

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

2.2.5.3 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。水深应覆盖 SCRS 设计路由上的最大和最小水深。

2.2.5.4 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。

2.2.5.5 应对张紧器张力、SCRS 重量（包括部件重量变化）、安装船与浮动设施距离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。

### 2.2.6 弃管/回收分析

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

2.2.6.2 弃管/回收分析应覆盖 SCRS 设计路由上的最大和最小水深，以及在最大水深位置立管进水的情况。

2.2.6.3 应采用本节 2.2.3 和 2.2.4 规定的静态和动态分析方法，对弃管/回收的作业过程进行分析。

### 2.2.7 曲线段稳定性校核

2.2.7.1 SCRS 及相连海管有曲线段时，应根据曲率半径确定安装期间允许的最大底部张力，保证 SCRS 在弯曲段的稳定性。

2.2.7.2 设计路由曲线段的最大底部张力由动态分析确定。

2.2.7.3 应计算曲线段之前直线段的最小敷设长度。

## 第3节 SCRS 提升系统

### 2.3.1 一般要求

2.3.1.1 本节适用于海上浮动设施上的 SCRS 专用提升系统。

### 2.3.2 SCRS 提升系统

2.3.2.1 SCRS 提升系统应能将 SCRS 安全地提升至托篮结构处并悬挂就位。

2.3.2.2 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校核应至少考虑下列载荷最不利的组合工况并考虑动载荷效应：

- (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，应包括立管的进水工况。

2.3.2.3 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。

2.3.2.4 如果 SCRS 提升系统的安装涉及对浮动设施结构的调整/改造，应在浮动设施设计过程中同步考虑。

## 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 本章适用于 SCRS 的以下建造阶段，包括：

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

3.1.1.2 SCRS 海上安装的全部环节应按照 CCS 批准的规格书、图纸、计算报告、程序和检验试验计划等进行检验，程序中应明确规定每项作业的限制条件。应提交 CCS 现场检验人员进行审批的主要资料如下：

- (1) 敷设方法和安装程序，包括 SCRS 敷设程序、SCRS 回接程序、立管锚固系统安装程序（如适用）和预调试程序等；
- (2) 焊接工艺程序、无损检测、外防腐涂层涂敷、VIV 抑制装置安装、阳极安装、防海生物涂层涂敷等技术程序；
- (3) SCRS 与海底管道的连接方法和工艺程序说明；
- (4) 敷设、安装使用的专门作业船及设备说明；
- (5) 从事海上安装的焊工能力认证证书和无损检测人员资格证书；
- (6) 检验和试验计划；
- (7) CCS 要求的其他文件资料。

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，应由具备相应能力认证证书/资质的人员完成。

3.1.1.5 SCRS 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。

3.1.1.6 环焊缝全尺寸疲劳试验的要求见附录 1。

### 第2节 安装方案

#### 3.2.1 一般要求

3.2.1.1 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；
- (4) 安装使用的专门作业船舶及设备说明。

3.2.1.2 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。

3.2.1.3 SCRS 安装方案中应考虑 S 型敷设方法等原因导致的立管扭矩积累，应进行监测并采取措​​施予以消除。

3.2.1.4 宜采用 HAZID、HAZOP 或其他适用方法对安装程序进行风险评估。

3.2.1.5 安装方案中应包括对作业海域天气的监测和预报（如每隔 12 小时）。对于需要一次性完成的安装工序，应根据天气预报结果选择足够长的天气窗口。当 SCRS 安装至接

近止返点时，应选择足够长的天气窗口以便止返点之后的安装作业一次性完成。

3.2.1.6 安装方案中应包括对 SCRS 张力的监测和控制措施，避免其超过允许范围。

### 3.2.2 敷设前准备

3.2.2.1 应根据选定的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，在敷设开始前应安装PLET防沉板。

3.2.2.2 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并为SCRS起始段提供足够的拉力。

3.2.2.3 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，以便立管接头完好保存且便于识别和回收。

3.2.2.4 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。

3.2.2.5 安装辅助设备和PLET防沉板安装完成后，应进行安装后调查，确认其完工状态符合使用要求。

### 3.2.3 SCRS 起始敷设

3.2.3.1 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。

3.2.3.2 铺管船应根据程序要求就位，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安装设计状态。

3.2.3.3 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、牺牲阳极安装、VIV抑制装置安装（如适用）、防海生物涂层涂敷（如适用）等；

(2) 张紧器向船尾移送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。

3.2.3.4 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) 张紧器向船尾移送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。

3.2.3.5 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。

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

3.2.3.7 当PLET作为SCRS敷设起始端时，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。

### 3.2.4 SCRS 正常敷设

3.2.4.1 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。

3.2.4.2 SCRS正常敷设工序通常包括：

(1) 双节点管预制（如适用）；

(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、牺牲阳极安装、VIV抑制装置安装(如适用)、防海生物涂层涂敷(如适用)等;

(3) 张紧器向船尾移送SCRS;

(4) 持续下放SCRS。

3.2.4.3 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、着泥点位置、VIV抑制装置起止点、防海生物段起止点等。

### 3.2.5 立管接头连接和下放

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

3.2.5.2 立管接头连接和下放工序通常包括:

(1) 立管接头在线连接, 包括焊接、无损检测、现场节点涂敷、法兰背密封试验、立管接头保护器拆装、拖拉头安装、索具连接(如A&R缆)和张力转换等;

(2) 立管接头下放, 包括立管接头通过托管架、持续下放和在湿存垫层着陆等。

3.2.5.3 湿式保存不应影响防腐涂层、VIV抑制装置、牺牲阳极、保温层和防海生物涂层等的完整性和功能。

### 3.2.6 SCRS 回收

3.2.6.1 SCRS回收作业开始前, 宜进行现状调查, 确认SCRS、立管接头保护器、拖拉头和索具等可进行回收作业。

3.2.6.2 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) 拆除立管接头保护器, 检查立管接头状态。

### 3.2.7 SCRS 横移

3.2.7.1 SCRS横移工序通常包括:

(1) SCRS提升系统拉入缆与拖拉头连接;

(2) SCRS下放至指定深度, 张力逐渐从回收缆转换至拉入缆。

3.2.7.2 对于横移距离较长的情况, 需要借助专用横移缆完成作业, 此时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, 张力逐渐从回收缆转换至横移缆;

(4) SCRS提升系统拉入缆与立管接头顶部落拉头进行水下连接; 如SCRS提升系统拉入缆直接与立管接头顶部落拉头连接存在困难, 可借助铺管船, 将SCRS从横移缆转移至主提升缆, 再转移到SCRS提升系统拉入缆;

(5) 回收拉入缆至适当深度;

(6) 横移缆张力完全转换至拉入缆后, 解除横移缆与拖拉头连接并移除横移工具。

3.2.7.3 SCRS在横移过程中, 横移缆、铺管船主吊机提升缆、SCRS提升系统拉入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。浮动设施与铺管船之间应保持安全距离。SCRS不应与任何结构发生碰撞, 如发生了意外碰撞, 应进行碰撞后果分析, 以确认能否继续使用。

3.2.7.4 SCRS横移过程中, 立管接头的挠曲不应超过最大允许角度。

### 3.2.8 SCRS 拉入悬挂

3.2.8.1 SCRS拉入悬挂过程中, SCRS提升系统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, 如发生了意外碰撞, 应进行碰撞后果分析, 以确认能否继续使用。

3.2.8.2 SCRS拉入悬挂工序通常包括:

- (1) 回收拉入缆至适当深度；
- (2) 连接导向缆至立管接头顶部拖拉头；
- (3) 拉入缆和导向缆配合完成立管接头与托篮结构对中并就位，完成悬挂。

3.2.8.3 SCRS拉入悬挂过程中，立管接头的挠曲不应超过最大允许角度。

### 3.2.9 SCRS 预调试

#### 3.2.9.1 SCRS预调试工序通常包括：

- (1) 充水；
- (2) 清管及测径；
- (3) 水压试验；
- (4) 排水（如适用）；
- (5) 干燥及惰化（如适用）。

### 3.2.10 应急程序

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

- (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) SCRS 损坏，如屈曲。

3.2.10.2 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。

3.2.10.3 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。

#### 3.2.10.4 当 SCRS 损坏时，应采取的应急程序包括：

- (1) 暂停作业；
- (2) 检查并确认 SCRS 损坏情况；
- (3) 开展应急评估，根据评估结果如需修复，应替换为完好管段。
- (4) 恢复作业。

3.2.10.5 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。

3.2.10.6 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。

3.2.10.7 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。

3.2.10.8 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。

3.2.10.9 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 SCRS 悬挂在浮动设施上，暂停作业至天气改善或设备修复完毕。

3.2.10.10 SCRS 拉入悬挂阶段出现恶劣天气或设备故障时，应保持拉入系统与 SCRS 连接并为其提供抵抗外部载荷的能力，暂停作业至天气改善或设备修复完毕。

#### 3.2.10.11 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 3.2.10.2 至 3.2.10.8 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或按照 3.2.10.9 和 3.2.10.10 进行应急操作；
  - ② 部分弃管并原地待机；
  - ③ 将立管回收至止返点位置，切割后弃管。

### 3.2.11 SCRS 后安装方案

3.2.11.1 当 SCRS 采用后安装方式时，安装方案应满足本章 3.2.1 至 3.2.4、3.2.5 中立管接头连接、3.2.7 至 3.2.10 的要求。

### 第3节 立管悬挂结构和提升系统的安装

#### 3.3.1 立管悬挂结构的安装

3.3.1.1 立管悬挂结构的安装应按照经批准的安装程序进行。

3.3.1.2 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。

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

3.3.1.4 立管悬挂结构与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）。

3.3.1.5 安装过程中应注意保护立管悬挂结构及其托篮结构的防腐涂层，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。

#### 3.3.2 SCRS 提升系统的安装

3.3.2.1 SCRS 提升系统的设备在出厂前应完成 FAT，SCRS 提升系统在首次作业前应完成 SIT，其建造和试验过程应经 CCS 见证检验。

3.3.2.2 SCRS 提升系统的 SIT 试验是验证提升设备（如绞车、锚机等）与浮动设施结构、控制系统之间的协同工作能力，确保系统能够安全、准确地完成立管的提升回接和下放作业。SIT 应至少包括如下试验：

- (1) 试验前系统的安装完整性和符合性检查；
- (2) 试验前的单机性能测试和安全测试；
- (3) 系统空载功能测试，确保绞车、刹车、控制系统等基础功能完好；
- (4) 系统载荷功能测试，验证绞车/锚机的牵引能力和提升系统稳定性；
- (5) 比对控制台读数与索具实测值，验证张力监测系统的准确性和可靠性。

3.3.2.3 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（如浮动设施中间甲板）以及下放至 SCR 安装开始前的指定位置（如浮动设施浮箱水平位置）。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。

3.3.2.4 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）。

3.3.2.5 SCRS 提升系统在浮动设施拖航之前应进行固定。

3.3.2.6 SCRS 提升系统的提升设备（如绞车、吊机等）每次作业前应进行检查。提升系统宜在实际作业前开展提升载荷试验，以确定其实际提升能力满足设计需求。

### 第4节 海上敷设与回接

#### 3.4.1 一般要求

3.4.1.1 海上敷设与回接应符合 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。

#### 3.4.2 预安装

3.4.2.1 在 SCRS 敷设之前，临时起始桩、PLET 防沉板、立管接头垫块、锚固系统等（如适用）的预安装应符合批准的安装程序要求。

#### 3.4.3 起始锚安装

3.4.3.1 起始锚的安装应按照经批准的安装程序进行。

3.4.3.2 常见的起始锚包括大抓力锚、重力锚和吸力桩，应根据海床特点选择不同种类的起始锚。

3.4.3.3 大抓力锚

(1) 大抓力锚安装前应对海底预安装位置进行调查，并核查大抓力锚的型式、重量、锚链及其附件的规格及长度是否满足设计要求。

(2) 大抓力锚的实际就位偏差及就位角度应在允许公差范围内。

(3) 大抓力锚下放至预安装位置后，应进行拉力试验及就位角度测量。拉力试验结果及就位角度均应满足批准的安装程序要求；若拉力试验结果或就位角度不满足要求，则需重新就位，并再次进行拉力试验及就位角度测量，直至结果满足要求。

(4) 大抓力锚安装结束后，各相关方应就其拉力试验及就位角度的相关报告进行签字确认。

3.4.3.4 重力锚

(1) 重力锚安装前应对海底预安装位置进行调查，并对其外观及下放索具等进行检查。

(2) 重力锚的实际就位偏差应在允许公差范围内。允许公差范围可参考表 3.4.3.4。

重力锚就位允许公差 表 3.4.3.4

最大偏移量方位	允许公差
纵向	±0.5
横向	±0.5

(3) 重力锚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。

(4) 若重力锚未能贯入到设计深度，则需提起并在 SCRS 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。

(5) 重力锚安装结束后，各相关方应就其贯入深度及拉力试验相关报告进行签字确认。

3.4.3.5 吸力桩

(1) 吸力桩安装前应进行地质地貌调查和检查，主要包括水下目标安装位置安装位置的土壤参数、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（允许安装公差可参考表 3.4.3.5）；

(3) 吸力桩通过抽吸泵贯入到设计深度，其艏向、倾斜度及贯入深度均应在允许安装公差范围内（允许安装公差可参考表 3.4.3.5），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。

吸力桩就位公差 表 3.4.3.5

描述	公差
距理论安装位置的距离	±2m
艏向角度	±5°
倾斜度	±3°

3.4.4 PLET 安装

3.4.4.1 PLET 安装应按照批准的安装程序进行。

3.4.4.2 根据设计和安装需求，PLET 分为整体式、分体式 and 折叠式。根据海底环境（如土壤条件、流速等）选择合适的安装方法和固定措施。整体式 PLET 采用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 适合空间受限的场景，安装时需要展开。

3.4.4.3 安装前，应注意如下要求：

- (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、土壤条件及海流情况，确保安装位置适合。

3.4.4.4 水下安装时，应注意如下环节：

- (1) 使用经过标定的定位系统（如声呐或 GPS），将 PLET 精确下放至目标位置；
- (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。

3.4.4.5 PLET 与 SCRS 或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。

3.4.4.6 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。

3.4.5 立管锚固系统安装

3.4.5.1 立管锚固系统主要包括固定夹具、吸力桩（或钢桩）及紧固索链。立管锚固系统也可采用桩和锚链连接 PLET 的方式固定 SCRS。

3.4.5.2 典型的吸力桩立管锚固系统见图 3.4.5.2（1），固定夹具见图 3.4.5.2（2），固定夹具与紧固索链连接方式见图 3.4.5.2（3）。

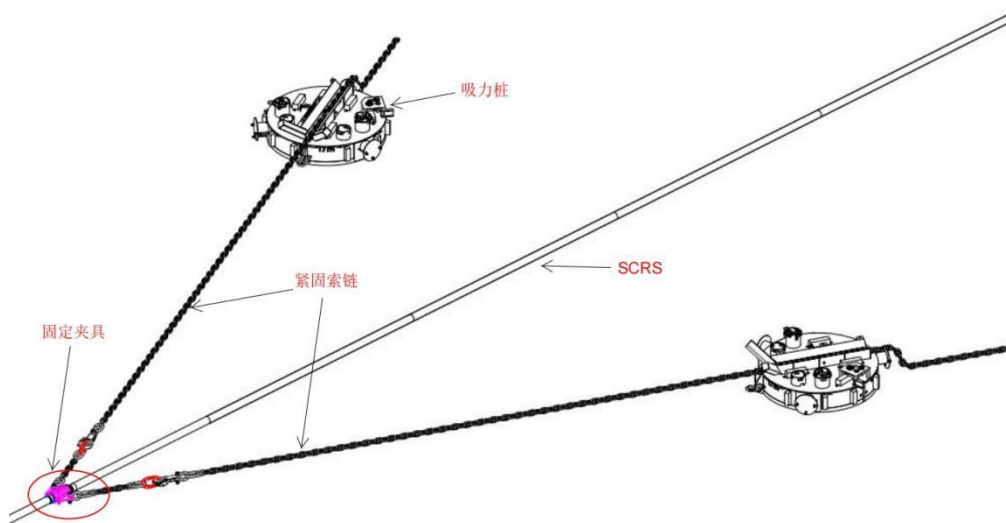


图 3.4.5.2（1） 立管锚固系统

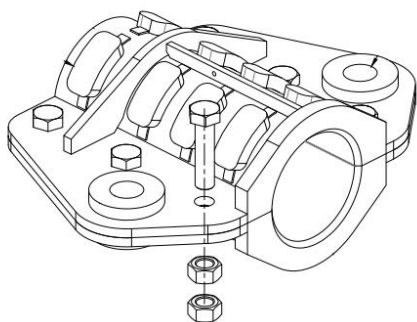


图 3.4.5.2（2） 固定夹具

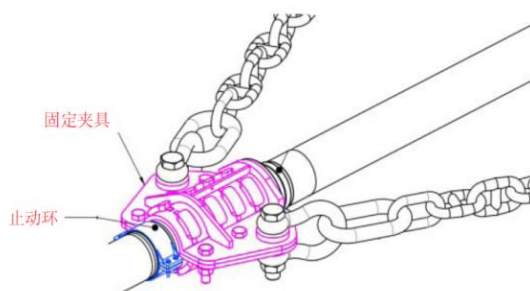


图 3.4.5.2（3） 固定夹具与紧固索链连接方式

3.4.5.3 立管锚固系统应取得 CCS 签发的产品证书。

3.4.5.4 立管锚固系统安装应按照经批准的程序进行。

3.4.5.5 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。

3.4.5.6 吸力桩的安装要求见 3.4.3.5。

3.4.5.7 紧固索链的安装：

- (1) 紧固索链安装前应对各链节进行外观检查；
- (2) 紧固索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。

3.4.5.8 应安装监控系统，实时监测立管和锚固系统的状态，或采用定期巡检的方式，确认其处于正常状态。

#### 3.4.6 SCRS 海上敷设

3.4.6.1 立管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。

3.4.6.2 立管接头、VIV 抑制装置、监测系统等的安装应符合规格书和批准的安装程序要求。

3.4.6.3 VIV 抑制装置应在立管下放海水之前进行。VIV 安装过程中，应满足如下要求：

(1) VIV 抑制装置安装前，应确定标准 VIV 抑制装置和抗海生物 VIV 抑制装置的开始安装位置和安装数量。

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

3.4.6.4 立管监测系统的安装不应损坏立管涂层，其监测点的安装位置、间隔及数量等应满足批准图纸的要求。立管结构监测装置（如适用）应考虑适合的安装方式。

#### 3.4.6.5 现场节点涂敷

(1) 现场节点涂层施工前应进行 PQT。

(2) 现场节点涂敷应按照经评定的涂敷程序进行施工，并根据检验试验计划进行生产检验。

(3) 现场节点涂敷的检验内容主要包括：

- ① 节点表面处理和检测；
- ② 涂层施工和基本工艺参数的监测；
- ③ 涂层的检测和试验；
- ④ 涂层修复和不合格涂层的剥离。

#### 3.4.6.6 SCRS 监测系统

(1) SCRS 监测系统主要包括内部介质状态监测系统、立管腐蚀监测系统、立管结构监测系统，监测系统应取得 CCS 产品证书。

(2) SCRS 内部介质状态监测系统主要针对介质的组分、密度、pH 值、出/入口温度及压力、流量/流速等进行监测，其安装完成后应进行现场性能试验。

(3) SCRS 内腐蚀监测系统可采用腐蚀挂片的形式进行监测。腐蚀挂片安装检验时应关注以下几点：

- ① 挂片放置在正在发生腐蚀或最有可能发生腐蚀的位置，主要包括死液区、高流速流体区域和冲击点、气液界面区域等。
- ② 扁平挂片在系统中安装时应使其一个边缘正对流体流向。
- ③ 挂片与其他挂片、挂片夹具以及管道壁应进行电隔离，以防止电偶腐蚀。
- ④ 挂片夹具应进行标记，以便在挂片投入使用时能够确定其安装方向。
- ⑤ 安装和拆卸挂片及挂片夹具前，必须对系统进行泄压。

(4) SCRS 结构监测系统主要针对立管张力、应力、角度、间距等进行监测，其安装完成后应进行现场性能试验。

#### 3.4.6.7 SCRS 控制系统

SCRS 应设置对内部流体介质的控制系统并在预调试时进行性能试验，试验对象主要包括：

- (1) 应急关断；
- (2) 压力保护装置；
- (3) 压力、温度和流量控制装置；
- (4) 释放装置。

3.4.6.8 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) 张紧器的动态张力；
- (3) 托管架端部的立管状态（采用水下摄像机）；
- (4) 上弯段及着泥点的 SCRS 状态（采用 ROV）；

(5) SCRS 的几何形状。

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

#### 3.4.7 SCRS 回接

3.4.7.1 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)。

3.4.7.2 SCRS 回接作业应符合批准的回接程序的要求。

3.4.7.3 SCRS 回接过程中应对缆索张力、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。

3.4.7.4 SCRS 回接作业应满足相应的天气限制条件要求。

3.4.7.5 所有潜水作业应按照批准的程序进行。

3.4.7.6 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。

3.4.7.7 SCRS 预安装和回接时, 安装平台及初始桩的定位精度、VIV 抑制装置的安装位置及长度、静态段阳极块的安装数量和位置, 以及立管锚固系统固定夹具的安装位置, 吸力桩 (或钢桩) 的艏向、倾斜度及贯入深度, SCRS 立管的安装角度等应控制在允许设计公差范围内。

3.4.7.8 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且不产生过大晃动。

#### 3.4.8 敷设后调查

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

3.4.8.2 敷设后调查应确认 SCRS 的最终状态符合规格书技术要求, 包括但不限于:

- (1) 涂层状况;
- (2) VIV 抑制装置状态;
- (3) 着泥点的位置范围;
- (4) 静态段阳极块的分布和状态;
- (5) 张紧状态下立管锚固系统固定夹具、吸力桩 (或钢桩) 和紧固索链的作业状态;
- (6) SCRS 立管的安装角度等。

## 第5节 预调试与完工调查

#### 3.5.1 预调试

3.5.1.1 SCRS 的立管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 CCS 批准。

3.5.1.2 应对预调试每个环节的施工过程和结果进行记录。

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

3.5.1.4 SCRS 压力试验采用的压力值应不小于设计压力的 1.25 倍, 保压时间不低于 8 小时。

3.5.1.5 SCRS 预调试主要包括:

- (1) 充水
  - ① 注入水宜能通过 50 $\mu$ m 的滤器, 悬浮物平均含量不宜超过 20g/m<sup>3</sup>。
  - ② 通过海底自由注水单元及 SCRS 的浮动设施端进行充水, 直至浮动设施端排气管线无气体排出。
  - ③ 充水结束后, 关闭排气阀及注水阀, 消除浮动设施与 PLET 端之间的压力差, 准备通球。
- (2) 清管及测径
  - ① 清管及测径可与 SCRS 充水同时进行, 也可单独进行。

- ② 开始前, PLET 端应安装清管/测径装置接收器, 具有接收清管/测径装置及排水作用。
  - ③ 应按照批准的清管及测径程序, 从 SCRS 的浮动设施端发射清管/测径装置, 直至将其推送至 PLET 端的接收装置, 同时将管道内的自由注水海水置换为经过滤、化学处理和示踪染色的海水。
  - ④ 结束后, 回收 PLET 端的清管/测径装置并安装 SCRS 的 PLET 端试压帽。测量测径板, 确定 SCRS 立管的最小直径。
- (3) 水压试验
- ① 在 SCRS 的浮动设施端拆除收发球装置并安装试压装置, 所使用的压力表或压力记录仪应进行校准。
  - ② 按照经 CCS 批准的试压程序对 SCRS 进行水压试验。
  - ③ 其他试验要求可参考 CCS《海底管道系统规范》中 5.8.3 的规定。
- (4) 排水(如适用)
- SCRS 的排水可参考 CCS《海底管道系统规范》中 5.8.4 的要求。
- (5) 干燥及惰化(如适用)
- SCRS 的干燥及惰化可参考 CCS《海底管道系统规范》中 5.8.5 及 5.8.6 的要求。
- 3.5.1.6 SCRS 与海底管道系统在敷设完成后应进行整体调试。

### 3.5.2 完工调查

3.5.2.1 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。完工调查应确认整个 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、立管接头状况、静态段的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, 出具完工调查报告并由各相关方签字确认。完工调查数据应记录, 作为立管全生命周期完整性管理的基础数据。

### 3.5.3 完工文件

3.5.3.1 SCRS 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 和焊接记录;
- (5) 无损检测程序和检测报告;
- (6) 焊工能力认证证书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6节 焊接和无损检测

### 3.6.1 一般要求

3.6.1.1 本节适用于 SCRS 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。

3.6.1.2 除满足本指南要求外, SCRS 建造阶段的焊工与设备、焊接材料、焊接工艺及工艺评定以及无损检测等要求, 还应满足 CCS《海底管道系统规范》或其他公认标准的适用要求。根据业主要求可采用更严格的控制衡准。

3.6.1.3 焊接应由具备能力认证证书的焊工按已批准的 WPS 实施。

3.6.1.4 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。

3.6.1.5 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。

3.6.1.6 SCRS 钢管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。

3.6.1.7 SCRS 在设计及安装前应对焊缝进行 ECA 评估分析，焊接缺陷的接受标准应取 ECA 确定的缺陷接受值和 CCS《海底管道系统规范》规范值二者中更为严格者。焊缝 ECA 评估应满足 CCS《海底管道系统规范》或其他公认标准的适用要求。

3.6.1.8 挠性接头的材料应具有足够的断裂韧性，应进行断裂韧性试验及断裂力学分析。应对所有挠性接头焊缝及其他规定位置的母材进行 CTOD 试验。

### 3.6.2 工艺评定记录

3.6.2.1 PQR 的焊接应采用与海上焊接相似的作业条件，其所在的环境条件及所使用的焊接设备类型应符合实际工况条件。

3.6.2.2 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 或 PAUT 方法。

3.6.2.3 PQR 的焊缝不能进行修补。

3.6.2.4 SCRS 环焊缝的 PQR 试验包括拉伸试验、弯曲试验、CVN 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、HIC 试验（如适用）、SSC 试验（如适用）以及全尺寸疲劳试验。

3.6.2.5 PQR 中应包括焊缝的断裂韧性试验，试验种类和温度应符合 CCS《海洋立管系统检验指南》的要求。

### 3.6.3 生产焊接的设计和准备

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

3.6.3.2 SCRS 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错边的错边量。SCRS 管口宜使用对口器进行对接焊。

3.6.3.3 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。

3.6.3.4 对于 SCRS 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平整度进行 100%的目视检查。

### 3.6.4 无损检测

3.6.4.1 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。

3.6.4.2 无损检测应由具备资质的人员按已评定的无损检测程序实施。

3.6.4.3 在进行无损检测之前，应对焊接接头进行外观检查。

3.6.4.4 无损检测应在最终热处理状态之后进行。

3.6.4.5 对于承受疲劳载荷的环焊缝，宜采用 UT 对焊根区域进行检测。

3.6.4.6 所有焊缝应进行 100%外观检查，以及下列任意一种 NDT 方法：

(1) 100%AUT；

(2) 100%UT+100%MT 或 100%UT+100%PT（对非铁磁性材料）；

(3) 100%RT；

(4) 100%PAUT。

3.6.4.7 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。

3.6.4.8 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。

3.6.4.9 对于重要的焊缝，如未参与系统压力试验的对接焊缝，应采用 100%UT+100%RT+100%MT 或 100%UT+100%RT+100%PT（非铁磁性材料）。如采用 AUT 或 PAUT，经业主和 CCS 同意可略去 UT 和 RT。

3.6.4.10 无损检测的验收标准应根据断裂力学分析结果、CCS《海底管道系统规范》第 8 章或其他公认标准的要求确定。

## 附录1 环焊缝全尺寸疲劳试验

### 1.1 一般规定

#### 1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本附录适用于 SCRS 的管道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附录的适用要求执行。

1.1.1.2 承受动态载荷的环焊缝应满足以下要求：

- (1) 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，具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。

1.1.1.3 如不满足本附录 1.1.1.2 的要求，在得到业主和 CCS 认可后，应通过全尺寸疲劳试验进行验证。

1.1.1.4 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。

1.1.1.5 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 SCRS 环焊缝：

- (1) 陆上预制时的钢管与钢管之间的环焊缝、钢管与锻造件之间的环焊缝；
- (2) 海上安装时的钢管与钢管之间的环焊缝、钢管与锻造件之间的环焊缝。

1.1.1.6 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。

### 1.2 试件设计与制备

#### 1.2.1 试件

1.2.1.1 试件的材料及成型方法、焊缝形式、焊接工艺等应与实际 SCRS 设计要求一致。

1.2.1.2 试件的直径、壁厚等关键特征尺寸应与实际 SCRS 设计要求一致。

1.2.1.3 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。

1.2.1.4 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。

1.2.1.5 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。

1.2.1.6 应对每个试件进行标识，保持 PQR 试验件及焊工的可追溯性，包括立管、锻件和焊材的工厂试验报告。

#### 1.2.2 试验焊缝

1.2.2.1 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，焊缝间距设置应合理。

1.2.2.2 所有试验焊缝均应按生产级 SCRS 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，可辅以额外的 RT 和 MT。

1.2.2.3 每种焊接工艺的 SCR 环焊缝应进行高、中、低共 3 组应力范围的疲劳试验，分别代表目标 S-N 曲线的高、中、低 3 个应力范围。每一等级应力范围应至少测试 3 组焊缝数据。

1.2.2.4 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室,以便与疲劳试验结果进行比较和记录。

### 1.3 试验载荷与循环次数

#### 1.3.1 试验载荷

1.3.1.1 试件承载的交变弯曲应力随时间呈正弦规律周期性变化。

1.3.1.2 试验应力范围根据实际情况确定。应力范围偏差不得超过要求加载应力范围的 $\pm 5\%$ 。在处理试验结果数据时,应按照实际加载的应力范围进行疲劳寿命评估。

1.3.1.3 应力范围应根据测试焊缝周围应变片读数的平均值计算得出。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。

#### 1.3.2 循环次数

1.3.2.1 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%。

1.3.2.2 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。

### 1.4 试验装置

#### 1.4.1 一般要求

1.4.1.1 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。

1.4.1.2 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。

1.4.1.3 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。

1.4.1.4 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。

### 1.5 试验方法与验收标准

#### 1.5.1 一般要求

1.5.1.1 除本附录规定外,环焊缝疲劳试验的试验程序与方法可遵循相应国家标准、行业标准或行业习惯做法。

#### 1.5.2 试验方法

1.5.2.1 疲劳试验应在空气中和室温环境下进行。试验时,试件内腔可充液加压,压力大小宜与 SCRS 的额定压力一致。

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

1.5.2.3 在疲劳试验过程中,应对试件的应变、内部压力等进行监测。

1.5.2.4 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。

1.5.2.5 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)以确定焊缝实际可以达到的更高水平。

1.5.2.6 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，应对焊接试件进行分析以确定原因，并对焊接程序进行修改和纠正。

1.5.2.7 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。

### 1.5.3 验收标准

1.5.3.1 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。

## 1.6 试验结果处理与文件

### 1.6.1 试验结果处理

1.6.1.1 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。

1.6.1.2 对于未发生破坏的焊缝试件，应进行磁粉检验并记录可能的缺陷。对发生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。必要时应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。

1.6.1.3 对于未发生破坏的试件，应变范围可根据焊缝周围所有应变片的平均值计算。对于发生破坏的试件，应变范围可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）来确定。

1.6.1.4 试验应力范围应由试样疲劳破坏位置的应变范围平均值乘以试件材料的弹性模量来确定。对于错边引起的局部应力集中，不进行调整。

### 1.6.2 试验结果文件

1.6.2.1 试验完成后，应提交疲劳试验结果文件以及无损检测报告。

1.6.2.2 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、应力范围的平均值、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。