



中国船级社

海上系泊系统用纤维缆指南

(初稿)

2022年9月

目 录

第 1 章 总则.....	- 1 -
第 1 节 一般规定.....	- 1 -
第 2 节 定义与缩写.....	- 1 -
第 3 节 接受标准.....	- 3 -
第 2 章 检验与发证.....	- 5 -
第 1 节 一般规定.....	- 5 -
第 2 节 产品检验.....	- 5 -
第 3 节 在役检验.....	- 7 -
第 3 章 材料和设计.....	- 9 -
第 1 节 一般规定.....	- 9 -
第 2 节 纤维缆材料.....	- 9 -
第 3 节 设计标准.....	- 10 -
第 4 节 刚度模型.....	- 11 -
第 5 节 疲劳.....	- 14 -
第 6 节 蠕变.....	- 15 -
第 7 节 扭矩协调性.....	- 18 -
第 8 节 长度管理.....	- 18 -
第 9 节 其他环境条件的影响.....	- 19 -
第 10 节 移动式系泊系统的考虑.....	- 19 -
第 4 章 试验.....	- 21 -
第 1 节 一般规定.....	- 21 -
第 2 节 破断载荷试验.....	- 21 -
第 3 节 伸长率与刚度试验.....	- 22 -
第 4 节 抗海水泥沙颗粒入侵试验.....	- 24 -
第 5 节 子绳眼环插接完整性试验.....	- 25 -
第 6 节 整绳循环耐久性试验.....	- 26 -
第 7 节 3-T 耐力试验.....	- 27 -
第 8 节 与钢丝绳的扭矩匹配试验.....	- 27 -
第 9 节 轴向压缩疲劳试验.....	- 28 -
第 10 节 蠕变速率验证试验.....	- 28 -
第 11 节 纱线试验.....	- 29 -
第 5 章 海上安装.....	- 30 -
第 1 节 一般规定.....	- 30 -
第 2 节 储存与运输.....	- 30 -
第 3 节 海上安装.....	- 31 -
第 6 章 在位检查和维保.....	- 34 -
第 1 节 一般规定.....	- 34 -
第 2 节 在位检查.....	- 34 -
第 3 节 在位维保.....	- 34 -

第1章 总则

第1节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本指南为定位系泊系统中纤维缆的检验提供依据，对于系泊系统中使用的其他材料的纤维缆本指南只供参考，其设计还需结合工程实际和纤维特性进行特别考虑。

1.1.1.2 对于含有纤维缆的定位系泊系统，纤维缆部分应符合本指南及接受标准的规定，纤维缆以外的部分应符合本社相关规范。

1.1.1.3 对于主管机关的有关要求，也应予以满足。

1.1.2 适用范围

1.1.2.1 本指南适用于永久性和临时性海上浮式装置的纤维缆定位系泊系统，且仅限于在端部终端之间自由延伸的纤维缆定位系泊系统。

1.1.2.2 对于码头和港口的系泊、拖曳锚腿和单点系泊系统等情形的纤维缆应用，本指南只供参考。

1.1.3 等效与免除

1.1.3.1 与本指南要求（包括接受标准的要求）不一致的设计规定，可予以接受以替代本指南的相应要求，其条件是以书面文件证明或表明其至少与本指南要求具有同等的安全水平，并经合同各方及本社同意。

1.1.3.2 对于具有新颖结构和新颖特性的纤维缆，如应用本指南的任何规定可能严重妨碍对其特性的应用或结构的使用时，经本社同意，可免除该规定。

1.1.4 风险评估的应用

1.1.4.1 如果业主、作业者、设计者或其它机构欲通过风险评估对纤维缆进行设计、制造或操作，经本社对其风险评估文件进行审核认为满意之后，则风险评估中采用的风险控制方案及措施可代替本指南的全部或部分规定。

第2节 定义与缩写

1.2.1 定义

1.2.1.1 本指南中所用定义如下：

(1) **浮式结构物 floating structure**

系指由浮力支撑满载重量的结构物。

(2) **纱线 yarn**

系指由一束未缠绕或扭曲的纤维的总称。

(3) **纱线干断裂强度**

系指在纱线断裂试验时测得的平均断裂载荷。

(4) **护套 rope jacket**

系指覆盖在缆绳或子绳外面的一种编织或者塑料层，用于保护缆绳并将缆绳结构固定。

(5) **端头 termination**

系指纤维缆绳连接到装配接口的方式（如拼接、密封型插口和楔形插口等）。

(6) 聚酯缆绳 polyester rope

系指由聚酯缆制成的缆绳，被广泛的应用于海上系泊系统。

(7) HMPE缆绳 HMPE rope

系指由高模量聚乙烯制成的缆绳，比聚酯缆具有更高的强度和刚度，其存在蠕变问题。

(8) 芳纶缆绳 aramid rope

系指由芳香族聚酰胺制成的缆绳，其轴向压缩问题亟待解决。

(9) 最小破断强度 minimum break strength (MBS)

系指纤维缆公认标准中规定的破断试验时必须达到的合格强度指标。

(10) 线密度

系指纤维缆在预加载荷下，其单位长度的质量。

(11) 刚度 stiffness

系指缆绳张力变化与应变变化之比。

(12) 静态刚度 static stiffness

系指在缓慢变化的拉力下，缆绳的张力变化与应变变化之比。

(13) 动态刚度 dynamic stiffness

系指在周期载荷作用下，缆绳的张力变化与应变变化之比。

(14) 动静刚度模型 static-dynamic model

系指一种刚度模型，其中平均载荷和循环载荷下的伸长率由载荷与伸长率中的不同斜率表示。

(15) 施工伸长 construction stretch

系指纤维缆在其使用寿命期间所经历的最大历史荷载而引起的永久伸长。

(16) 购买长度 as-purchased length

系指纤维缆出厂时的长度（在规定的最小载荷下）。

(17) 安装拉伸 install stretch

系指由于安装张力引起的拉伸。

(18) 安装长度 as-installed length

系指安装后的长度，为购买长度加上安装拉伸的长度。

(19) 永久性系泊系统 permanent mooring

系指浮式结构物的系泊系统具有较长的设计寿命，一般为20年或者更长。

(20) 轴向压缩疲劳 axial compression fatigue

系指芳纶或相似类型的纤维缆在低张力或受压下的一种失效模式。

(21) 蠕变 creep

系指在持续的张力或循环负荷下，长度的永久增加。

(22) 蠕变失效 creep repture

系指由于纤维缆在载荷下随时间的累积、不可恢复的伸长而导致的纤维缆失效。

(23) 扭矩匹配法 torque-matched approach

系指一种与6股钢丝绳等扭矩组件扭转特性相匹配的纤维缆绳设计方法。

1.2.2 缩写

缩写	英文全称	中文名称
MBS	Minimum Break Strength	最小破断强度
ROV	Remotely Operated Vehicle	遥控潜水器
CI	Cordage Insitute	缆绳协会
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
MODU	Mobile Offshore Drilling Unit	可移动海上钻井装置
TDS	Technical Data Sheet	说明书

1.2.3 符号

符号	符号定义
EA	刚度
ΔT	载荷变化值
$\Delta \varepsilon$	应变变化值
K_r	等效无量纲刚度
C	蠕变系数
K_{rs}	静态刚度
K_{rd}	动态刚度
N	循环次数
R	张力范围与最小破断强度比值

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，对于纤维缆的设计、制造、安装、检验和试验，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承认的标准时，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 本社接受的纤维缆主要相关标准如下：

序号	标准号	标准名称
1	API RP 2SK	Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures
2	API RP 2SM	Recommended Practice for Design, Manufacture, Installation, and Maintenance of Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring
3	API RP 2I	In-service Inspection of Mooring Hardware for Floating Structure

1.3.2.2 本社接受的纤维缆相关的其他标准将在本指南各章节中相应规定。

海上系泊系统用纤维缆指南

第2章 检验与发证

第1节 一般规定

2.1.1 一般要求

2.1.1.1 经船东、制造厂或其代理人申请，CCS 将作为检验方依据本指南，对海上系泊系统用纤维缆进行发证检验和鉴证检验，确认合格后，可签发相应的证书及检验文件。

2.1.1.2 海上系泊系统用纤维缆的检验和发证应符合 CCS《钢制海船入级规范》和/或《海上移动平台入级规范》中第1篇相关规定和本指南的相应要求。

2.1.1.3 按本指南规定完成检验后的纤维缆，如需作重大变更时，申请人应及时通知本社并取得相应认可。

第2节 产品检验

2.2.1 一般要求

2.2.1.1 本节给出了对海上系泊系统用纤维缆进行产品检验的相关要求，包括产品设计图纸资料的审查、制造检验和证书签发。

2.2.1.2 申请方可根据 CCS《钢质海船入级规范》第1篇第3章的要求，对海上系泊系统用纤维缆申请产品检验。

2.2.2 设计、试验和制造文件

2.2.2.1 除《海上移动平台入级规范》和《海上浮式装置入级规范》中列出的适用文件外，纤维缆系泊系统的设计、试验和制造的审查资料包括但不限于：

- (1) 破断载荷试验；
- (2) 伸长率与刚度试验；
- (3) 抗海水泥沙颗粒入侵试验；
- (4) 子绳眼环插接完整性试验；
- (5) 整绳循环耐久性试验；
- (6) 3-T 耐力试验；
- (7) 与钢丝绳的扭矩匹配试验；
- (8) 纱线干断裂强度和伸长率试验；
- (9) 纱线-纱线磨损试验；
- (10) 纤维缆绳设计说明书；
- (11) 纱线说明书；
- (12) 制造说明书；
- (13) 材料认证报告；
- (14) 端头设计说明书；
- (15) 纤维缆绳生产报告；

2.2.2.2 已审查的资料，如有原则性的修改或补充，申请人应将修改或补充部分重新提交审查。

2.2.3 材料检验

2.2.3.1 纤维缆绳制造厂在收到每批用于制造纤维缆绳的材料后应进行下列项目的进厂检验，试验方法及抽样要求见下表，检验的结果应符合纤维缆生产厂所标明的相关技术要求：

纱线检验项目表

表 2.2.3.1

检验项目	标准	抽样方法及数量
干态破断载荷及伸长率	ASTM D885	每5000kg纤维缆材料至少抽取1个样品。
湿态纱线间摩擦性能	ISO18692	每 2000kg 纤维缆材料抽取 1 个样品，每个纤维缆订单至少进行一次抽取试验。
线密度	ISO18692	每5000kg纤维缆材料中抽取1个样品。
整理剂含量	ASTM D2257	每2000kg纤维缆材料抽取1个样品，每个纤维缆订单至少进行一次抽样试验。

2.2.3.2 绳截面和绳段检验:

(1) 应从每根连续长度的纤维缆上取一段长度约为 2 米 (6.6 ft) 的纤维缆样品，或从其中一个切割点 (如果在拼接前将该连续长度切割成较短的长度)。绳段应在末端垂直切割，并用胶带固定，以防解开。

(2) 应对两米样品绳段进行测量和称重，精确至±0.1%，并将重量除以长度，以确定每单位长度的重量。

2.2.3.3 强度检验：纤维缆承重子绳的纤维平均标准化断裂强度（初度）应不低于 0.78 N/tex。

2.2.4 制造检验

2.2.4.1 海上系泊系统用纤维缆应由 CCS 认可的工厂制造。

2.2.4.2 制造厂应具备生产纤维缆所必需的生产、试验设备和制造能力，以及完善的质量保证体系，以确保所生产的纤维缆具有均匀一致的物理性能和机械性能。

2.2.4.3 纤维缆生产前，制造厂应提交相应的生产工艺技术规程供船级社认可，此规程应至少包括但不限于以下内容：

- (1) 纱线组合工艺；
- (2) 纤维缆组合工艺；
- (3) 股线装配工艺；
- (4) 纤维缆护套加工工艺；
- (5) 端头处理工艺。

2.2.4.4 纤维缆生产过程应严格按照认可的生产技术说明书进行，当工艺发生改变时，应重新提交 CCS 进行认可。

2.2.5 纤维缆绳检验

2.2.5.1 对于系泊系统用纤维缆成品，应目视检查其外观无损伤，校验其绳体结构其设计相符，并应检查其搓捻均匀度。

2.2.6 标记和合格证书

2.2.6.1 每卷成品纤维缆绳均应在绳体的明显易见处（例如护套）印刷上标明产品名称、规格、制造厂名(或商标)的信息。

2.2.6.2 经验收合格的纤维缆绳应在每根绳的端头处，以牢固的方式（建议以铅封方式）系上至少含有纤维缆绳编号、材料、结构和 CCS 标志的标签。

2.2.6.3 原材料制造厂应为每批制绳的原材料提供附有如下性能参数的原材料质量保证书：

- (1) 纤维缆牌号；
- (2) 线密度；
- (3) 干态破断载荷及伸长率；
- (4) 纱线-纱线摩擦性能；
- (5) 加入的整理剂种类及相关说明书（TDS）（如有时）；
- (6) 整理剂的含量及水溶性说明。

2.2.6.4 制造厂应对合格的纤维缆绳提供至少具有下列内容的合格证书：

- (1) 产品名称、型号及编号；

- (2) 用于制造纤维缆绳的材料；
- (3) 纤维缆绳的线密度；
- (4) 纤维缆绳的整卷长度和直径；
- (5) 纤维缆绳的结构型式；
- (6) 纤维缆绳的额定破断载荷及实测的湿态破断载荷；
- (7) 制造和检验日期；
- (8) 许用温度；
- (9) 产品储存期。

2.2.7 产品发证

2.2.7.1 产品检验合格后，由 CCS 向申请人签发海上系泊系统用纤维缆的产品证书和/或等效证明文件。

第3节 在役检验

2.3.1 一般要求

2.3.1.1 在役检验一般应符合 API RP 2I、《海上移动平台入级规范》和《海上浮式装置入级规范》的相关要求。

2.3.1.2 CCS 入级的海上系泊系统用纤维缆，为保持证书的有效性，应按照本节规定进行各种检验（如适用时）。CCS 验船师在检验中可根据其专业判断扩大检验范围，业主应提供相应的检验条件。

2.3.1.3 在检验中，如发现海上系泊系统用纤维缆的损坏或缺陷并认为必须立即进行处理时，业主或其代理人应主动通知 CCS。

2.3.1.4 业主有责任向 CCS 提出保持证书有效性的各种检验的申请，并按要求作好检验的项目准备和为检验提供安全措施。

2.3.2 年度检验

2.3.2.1 所有入级系泊系统用纤维缆应进行年度检验。年度检验应在初次入级检验日期或上次特别检验日期的每周年日的前后 3 个月内进行。

2.3.2.2 年度检验项目包含：

- (1) 审查纤维缆锚腿的再次张紧记录，并与设计方确认是否为塑性形变引起的拉紧预留有足够长度的链索，以确保纤维缆绳不接触到下面的导缆器并保持在水面以下；
- (2) 确认记录的蠕变值符合系统的设计预期值。任何偏差都应由设计方进行修正，并视情况采取适当的补救措施；
- (3) 确认系泊缆的预张力应限制在推荐的设计限值范围内。

2.3.3 特别检验

2.3.3.1 所有入级系泊系统用纤维缆应进行特别检验。特别检验可在到期之日前 1 个年度检验开始，于到期之日前完成。如特别检验开始的时间早于到期日前 1 个年度检验，则全部特别检验应在特别检验开始后的 15 个月内完成。在此情况下特别检验开始时进行的项目，方可作为特别检验的组成部分。对非常规设计、搁置状态或异常环境下的系泊系统用纤维缆，其特别检验应根据具体情况确定。

2.3.3.2 特别检验项目包含：

- (1) 特别检验需要有一个详细的检验计划，确保掌握量化信息以备不时之需，同时检测者也会有一份待检物品的清单。特别检验计划应指明具体使用了何种方法及手段对系泊系统的运行工况进行检验；
- (2) 特别检验包括坞内检验或水下检验（ROV 或潜水员进行），同时系泊系统所有部件的检查应使得现场验船师满意；
- (3) 审查纤维缆锚腿的再次张紧记录，并与设计方确认是否为塑性形变引起的拉紧预

留有足够长度的链索，以确保纤维缆绳不接触到下面的导缆器并保持在水面以下；

(4) 确认记录的蠕变值符合系统的设计预期值。任何偏差都应由设计方进行修正，并视情况采取适当的补救措施；

(5) 确认系泊缆的预张力应限制在推荐的设计限值范围内；

(6) 特别注意检查纤维缆绳终端的情况；

(7) 检查缆体或裂缝处是否有异物，如有应将其清除；

(8) 如有海洋生物影响绳索的状况，应在不损坏绳索的情况下进行清除。

2.3.4 临时检验

2.3.4.1 临时检验系指不属于各种定期检验的任何检验。发生下列情况时，系泊系统的业主或其代理人应申请临时检验：

(1) 发生系泊系统用纤维缆状态失效的损坏、缺陷或失效时；

(2) 在经过了强烈的风暴之后或者其他事故（包括坠物、碰撞、缆线碰触等）后考虑进行特殊事件检测时。

2.3.4.2 特殊事件检测临时检验的范围应根据检测目的而定。例如，如果是因物体掉落而进行的检测，该检测宜限定在物体掉落可能损坏的区域内进行。

2.3.4.3 遭受严重风暴（即接近于设计极限的工况）后，应至少按照年度检验要求进行特殊事件检测。适用时，应考虑采取部分特别检验要求的检验措施。

2.3.4.4 进行水下系泊系统巡检时，如发现纤维缆任何破损，应及时针对破损范围和深度制定应对措施，包括增加保护、修复和更换决

第3章 材料与设计

第1节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 海上系泊系统用纤维缆设计应遵循 API RP 2SM 和《材料和焊接规范》等规范中的方法。

3.1.1.2 一般而言,带有纤维缆的系泊系统顶部和底部应设置适当长度的锚链或钢丝绳。上部锚链/钢丝绳的长度应足以保证聚酯缆上端在其使用寿命期间保持在不受水面船舶和海上活动机械损伤、紫外线照射和海生物影响的深度。

3.1.1.3 本章适用于永久性系泊系统,对移动式系泊系统,可以参考本章要求,但某些条款并不适用。

第2节 纤维缆材料

3.2.1 原材料

3.2.1.1 海上系泊系统用纤维缆的制缆原料通常采用聚对苯二甲酸乙二醇酯(聚酯, PET)、聚芳酰胺(芳纶, Aramid)、高分子量聚乙烯(HMPE)及聚酰胺(尼龙, Nylon)材料,这些原料的性能列于表 3.2.1.1。如采用其他材料,应有足够的证据证明其性能满足要求。

纤维缆原料参数 表 3.2.1.1

参数	纤维材料类型			
	聚酯	芳纶	HMPE	尼龙
强度重量比	中	高	高	低
刚度	中	高	高	低
拉-拉疲劳损伤	高	高	高	低 ^a
轴向压缩疲劳损伤	高	低 ^a	高	高
耐磨性	高	中	高	低
蠕变抗力	高	高	低	中

注: a 代表这种性能的效果取决于结构和应用。

3.2.1.2 海上系泊系统用纤维缆的原材料应质地良好、材质均匀、耐腐蚀和耐老化。制造方宜对材料性能采用符合本指南第4章的试验进行验证。

3.2.1.3 制绳用整理剂应符合以下要求:

(1) 海上系泊系统用聚酯缆绳用整理剂应对聚酯缆或成品聚酯缆绳的性能无损伤,且处理后的聚酯缆可降低各绳股纱线间的摩擦,延长合成聚酯缆的使用寿命;

(2) 海上系泊系统用聚酯缆绳用整理剂应能在聚酯缆绳的规定寿命期内长期有效。聚酯缆生产商应提供相关的证明以说明其采用的整理剂的长效性。

3.2.1.4 制绳用护套的材料应符合以下要求:

(1) 用于制造护套的材料应该足够的柔软,以使聚酯缆能够在设计载荷下通过滚轮或一定直径的滑轮布放时不致损伤聚酯缆本体;

(2) 对于聚酯缆短时间或长时间的弯曲(如安装或缠绕在卷盘上的运输)应根据聚酯缆及护套的材料和尺寸对最小半径分别予以限制;

(3) 选取的护套的材料应有良好的耐低温性能,以保证其在低温下仍能对聚酯缆提供足够的保护。

3.2.2 结构设计

3.2.2.1 常用的纤维缆典型结构型式有:平行纤维缆(平行纱线)、平行加捻股(多股绳)、平行编织股(多股绳)、6股(有非承重芯)、7股(有承重芯的6股绳)、18股(6+12)、

36 股 (6+12+18)、编绞绳 (8 股绳)、单编织绳 (12 股绳) 及双编织绳。

3.2.2.2 护套的设计应符合以下要求:

- (1) 护套应能保证纤维缆在运输、安装或操作阶段提供足够的保护;
- (2) 护套的设计形式应对纤维缆提供足够的保护, 以防止在使用过程中海水中漂浮颗粒或其他外来坚硬杂质进入绳股间对纤维缆造成伤害;
- (3) 护套可以是编织、挤压、胶带缠绕或其他方式;
- (4) 护套应牢固固定在端接区域, 以防止护套从端部脱落而暴露承载芯;
- (5) 在有可能发生鱼类咬伤纤维缆的区域, 可采用加硬护套的方式;
- (6) 应该在护套或纤维缆可见部分提供清晰可见的标记, 以便检测纤维缆的扭转情况;
- (7) 护套的设计应确保允许水能完全充满纤维缆结构, 水的作用是传递热量, 并在循环加载过程中减轻热量积聚。

3.2.1.3 端头的设计应符合以下要求:

- (1) 纤维缆通常采用的端头型式为捻接式, 对于其他形式的端接, 应根据具体情况提交详细的设计报告和测试报告以供批准;
- (2) 端头设计应仔细考虑端接重量、弯曲限制和热积累;
- (3) 纤维缆生产厂商所标明的最小破断强度应为包括纤维缆绳和其上所有端头部分的强度。样品试验所用纤维缆绳应与实际使用的纤维缆端头类型和结构型式方面一致;
- (4) 对于捻接式, 应提供一种方法, 以尽量减少拼接眼和终端连接硬件之间的摩擦并最大限度地提高耐磨性。可使用纤维布、弹性材料、低摩擦涂层等。捻接式需要以销、衬套或套环形式安装在孔眼中的硬件, 以便在纤维缆和系泊系统中的其他组件之间进行连接。

3.2.3 防沙层

3.3.3.1 纤维缆的强度损失是由于水性颗粒 (如沙子或砂砾) 引起的内部磨损。纤维缆不得用于高浊度区域, 除非采用合适的护套或过滤器进行保护, 以尽量减少颗粒渗透。

3.3.3.2 为达到防止颗粒进入的要求, 应根据第 4 章内容对护套或过滤器进行试验, 其试验条件应反映纤维缆暴露于颗粒物时的状况。

第 3 节 设计标准

3.3.1 强度设计安全系数

3.3.1.1 对于纤维缆在完整和破损工况下的安全系数可以参考 API RP 2SK 的相关要求。

3.3.2 疲劳设计安全系数

3.3.2.1 对于纤维缆疲劳寿命的安全系数可以参考 API RP 2SK 的相关要求。

3.3.3 最小张力和最大允许低张力循环数

3.3.3.1 对于容易受轴向压缩疲劳影响的芳纶和类似纤维缆, 需要保持最小张力并保持低于最大的低张力周期数。本条不适用于聚酯、尼龙和 HMPE 类型的纤维缆。

3.3.3.2 业界目前推荐的标准是:

- (1) 完整系泊状态下背风缆的最小张力为 2%MBS。
- (2) 在 1%~20%MBS 的拉伸范围内, 经 2000 次动载荷循环后, 残余强度不小于 95% MBS;
- (3) 如果在预安装后悬挂浮筒, 则最小张力为 2% MBS。

3.3.4 蠕变

3.3.4.1 蠕变失效是 HMPE 缆和类似纤维缆面临的问题, 推荐的蠕变失效安全系数是完整系泊条件下缆绳使用寿命的 10 倍。

3.3.4.2 避免蠕变断裂的安全系数: 5 (监测到蠕变) 或 10 (没监测到蠕变)。

3.3.4.3 对按照相关要求设计的聚酯缆、芳纶和尼龙系泊系统, 在完整系泊条件下, 蠕

变失效通常不是设计问题。然而，对导致长时间负载（大于纤维断裂强度的 70%）的情况，需要考虑蠕变破坏。

3.3.5 扭矩协调性

3.3.5.1 对于与钢丝绳连接的聚酯缆系泊系统，钢丝绳每捻长度的平均旋转角度不应超过 5° 。

第 4 节 刚度模型

3.4.1 一般要求

3.4.1.1 本节主要适用于聚酯缆，同时也可用于 HMPE 和芳纶等纤维缆的刚度设计和分析提供指导。

3.4.2 刚度特性

3.4.2.1 纤维缆由具有粘弹性的材料制成，其刚度特性随着载荷时长、载荷幅度、载荷周期、循环次数以及加载历史而变化。

3.4.2.2 工业界目前采用简化模型，一方面能够捕捉到纤维缆刚度最重要的特征，另一方面保证预报的缆绳张力和船体位移可以相对保守。目前工业界常用的两种计算模型为：上下边界刚度模型和静动态刚度模型。

3.4.2.3 HMPE 比芳纶和聚酯具有更高的静动刚度，其准静态刚度主要取决于风暴持续时间。

3.4.3 上下边界刚度模型

3.4.3.1 上下边界刚度模型定义了下限刚度（安装刚度）和上限刚度（风暴刚度）作为系泊系统计算的第一次近似，刚度下限值和上限值分别用于计算系泊系统最大位移和最大张力。

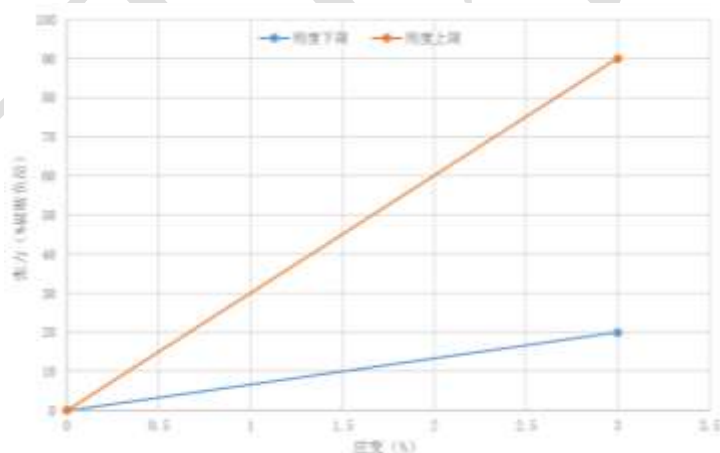


图 3.4.3.1 聚酯缆上下边界刚度模型

3.4.3.2 上下边界模型由于其相对简单而在业界得到了广泛的应用，但其在使用时存在一定的问题：

- (1) 没有系统的方法确定上、下边界刚度，其取值具有随机性；
- (2) 聚酯缆的刚度特性相对复杂，刚度是载荷类型、载荷历程、幅值和持续时间的函数，用上下两个刚度来代替复杂的特性可能会导致结果过于保守或危险。为了避免这一问题，设计人员会选择中间值，但中间值的选取也是随机的，从而使问题变的更加复杂。

因此，虽然上下边界刚度模型是一种简单且广泛使用的模型，但上下限值的确定和选用需要仔细的考量。

3.4.4 静动态刚度模型

3.4.4.1 聚酯缆的伸长特性，很大程度上取决于材料的大分子结构。聚合材料的形态通常展现出晶体部分和非晶体部分。静态刚度是缓慢加载时受拉构件的刚度，由于加载缓慢，材料的晶体部分和非晶体部分都可以对载荷做出反应；动态刚度是当受拉构件处于周期载荷作用时的刚度。现有试验结果和实际工程项目表明，动态刚度为静态刚度的 2~3 倍。若在浮体系泊计算时不考虑上述特性，缆绳的张力和浮体位移的预报将会不准确。因此，要采用静动态刚度模型计及聚酯缆的伸长特性。

3.4.4.2 在静动态刚度模型中，在初始张力到平均张力的载荷曲线中使用静态刚度，在之后周期载荷部分使用动态刚度。

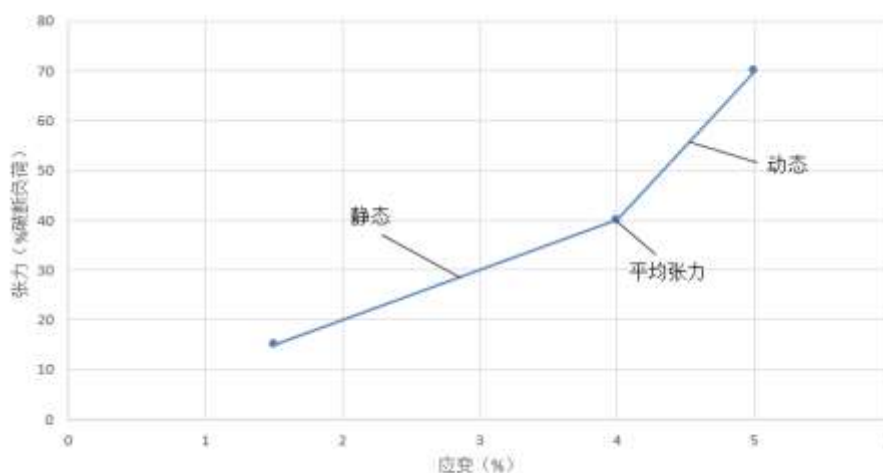


图 3.4.3.2 聚酯缆静动态刚度模型

聚酯缆刚度定义如下，

$$EA = \frac{\Delta T}{\Delta \varepsilon}$$

式中： ΔT ——载荷变化值；

$\Delta \varepsilon$ ——应变变化值；

EA ——刚度或弹性模量与缆绳截面积的乘积，kN。

聚酯缆的等效无量纲刚度 K_r 定义如下，

$$K_r = \frac{EA}{MBS}$$

式中： MBS 为聚酯缆的最小破断载荷，kN。

3.4.4.3 基于工业界的研究，推荐使用准静态模型计算静态刚度。对预处理后的聚酯缆绳进行静态试验，从预张力点处开始，在一定的载荷水平处，蠕变逐渐达到平衡。准静态刚度取连接预张力起点和蠕变平衡点的割线刚度。蠕变是载荷时长或风暴时长的函数，可以表达为时间对数的线性关系。准静态方程定义如下，

$$K_{rs} = \frac{T_2 - T_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 + C \times \log(t)}$$

式中： T_2 ——试验初始张力，通常是系泊缆的预张力，kN；

T_1 ——试验终点张力，通常是系泊缆的风暴平均张力，kN；

ε_1 ——起点应变；

ε_2 ——终点应变；

C ——蠕变系数，通过 3.6.3 的回归分析确定；

t ——环境事件的持续时间。

如适用，准静态刚度试验需要针对安装前、安装后和使用过的缆绳分别进行。若使用其它静态刚度模型，需经过专门的试验提供合适的数据，并经 CCS 审查。

3.4.4.4 动态刚度方程推荐选择三参数方程，如下：

$$K_{rd} = \alpha + \beta L_m + \gamma F + \delta \log(P)$$

式中： L_m ——平均载荷占最小破断力的百分比；

F ——载荷幅值占最小破断力的百分比；

P ——载荷周期，s；

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ——与上述参数相关的系数，可通过试验确定。

(1) 载荷幅值的影响

工业界的研究表明，对随机载荷下的极限响应来说，载荷幅值的效果要小很多。疲劳载荷下，张力幅值的效果可以忽略。基于这些，推荐以下做法：

① 在正弦载荷的情况下，在强度和疲劳分析中， F 取最大张力幅值；

② 在随机载荷的情况下， F 取最大张力的0.5倍；

③ 波浪载荷下的疲劳分析， F 可以忽略。

(2) 载荷周期的影响

对于波频响应来说，载荷周期取响应峰值周期；对于低频响应和涡激振动（VIM）响应来说，可以取系泊系统的固有周期。

(3) 加载历史的影响

为了研究加载历史的影响，缆绳的状态被分成了三种：

① 安装前：缆绳没有被预拉，刚度最低；

② 安装后：缆绳在安装期间被预拉，达到了初步的磨合；

③ 老化：预拉之外，缆绳又经过了剧烈的载荷，达到了完全磨合的状态。

现有的试验数据表明，安装后的缆绳刚度和使用过的缆绳刚度差别很小。因此，可以直接按照比较保守的方法采用使用过的缆绳刚度。

3.4.5 初步设计时刚度值

3.4.5.1 在聚酯缆系泊系统初步设计时，由于无法得到基于试验的精确刚度值，需要使用近似的刚度值。本节可对初步设计的刚度值提供指导，这些数据来源于部分聚酯缆永久系泊系统的试验数据。

3.4.5.2 动态刚度的三参数模型方法（参见3.4.4.4）是根据已有的聚酯缆试验数据推导得到，如表3.4.5.2所示。其中上界值对张力较为保守，下界值对偏移量较为保守。这种方法需要粗略估计平均张力、张力幅值和加载周期的影响。

初步设计时的动刚度系数

表 3.4.5.2

系数	上界值	下界值
α	26.0	20.3
β	0.28	0.22
γ	-0.42	-0.33
δ	-0.97	-0.76

3.4.5.3 准静态刚度是根据已有的试验数据测量得到，试验结果表明安装后的聚酯缆与老化的聚酯缆以及不同厂家的聚酯缆的刚度变化较大，见表3.4.5.3。

初步设计时的准静态刚度值

表 3.4.5.3

聚酯缆绳状态	刚度等级		
	低 (MBS)	中 (MBS)	高 (MBS)
安装后	10	13	15
老化	13	15	18

3.4.6 其他刚度模型

3.4.6.1 若选用其他刚度模型，需保证这些模型可以反映聚酯缆基本的伸长特性且可以得到可靠的预报结果。

第5节 疲劳

3.5.1 拉-拉疲劳

3.5.1.1 对于聚酯缆，在缺少更好的数据下，可以采用回归分析得到的“均值-两个标准差”的曲线来进行聚酯缆绳疲劳分析。聚酯绳比锚链和钢丝绳具有更好的抗疲劳性，因此疲劳评估通常集中在疲劳寿命最短的锚链和钢丝绳上。

设计曲线的表达式如下：

$$NR^M = K$$

式中：N——循环；

R——张力范围与最小破断强度（MBS）的比值；

M——取值为 5.2（T-N 曲线的斜率）；

K——取值为 25000（T-N 曲线的截距）。

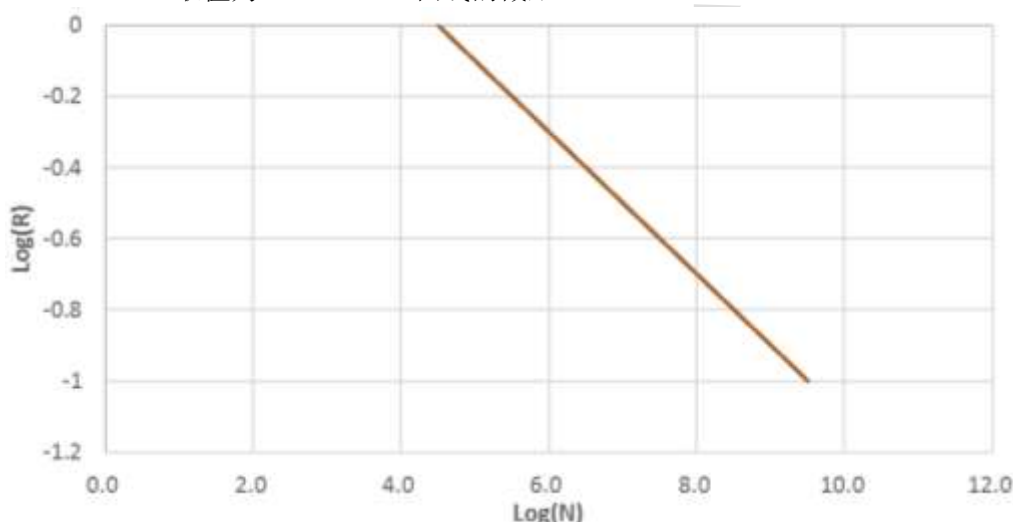


图 3.5.1.1 聚酯缆疲劳设计曲线

3.5.1.2 对于其他类型的纤维缆，设计者应经过测试或从制造商获得疲劳数据，以确定系统的拉-拉疲劳寿命。

3.5.2 轴向压缩疲劳

3.5.2.1 对于聚酯缆和 HMPE，不需要进行轴向压缩疲劳分析。但芳纶缆在低张力下容易发生轴向压缩疲劳而导致失效，下述小节主要针对芳纶缆的轴向压缩疲劳进行介绍。

3.5.2.2 由于轴向压缩疲劳的失效机理，芳纶缆在系泊系统的应用中不太理想。但在行业的长期研究中表明，这一问题可以通过下述措施来克服：

- (1) 改进接头、船用饰面和护套；
- (2) 建立合适的最小张力标准和分析流程；
- (3) 进行轴压疲劳试验，以提供足够的抗轴压疲劳破坏的能力。

3.5.2.3 针对 3.5.2.2 中提到的第 (2) 条和第 (3) 条措施，其推荐的标准为：

(1) 对于在强风暴环境（通常 100 年重现期）的完整系泊，其背风处芳纶缆底部的预测最小张力应大于 2%MBS；

(2) 缆绳在承受 2000 次动态负载循环（张力范围为 1%~20%MBS）后应保持 95%MBS 的最小剩余强度；

(3) 如果芳纶缆在预安装后悬挂了浮筒，则其应保持 2% MBS 的最小张力。

3.5.2.4 在 3.5.2.3 中的 (1) 和 (2) 中的要求可根据项目的具体情况加以修改，但不应与具体的原则有重大偏差。为了满足审查需求，设计者应提供以下信息：

- (1) 最小张力的设计标准；
- (2) 轴向压缩疲劳试验步骤：张力范围、试验循环次数和频率；
- (3) 试验后的残余强度；

(4) 设计准则和试验步骤的依据。

3.5.2.5 在芳纶缆系泊系统分析时，应采用时域分析方法；若采用频域分析方法，则首先要采用时域分析进行验证。

3.5.3 疲劳寿命

3.5.3.1 纤维缆定位系泊系统的疲劳安全系数与部件的可检测条件和位置相关，系泊索各部件的疲劳安全系数应不小于表 3.5.3.1 中的规定值。

系泊索部件疲劳安全系数

表 3.5.3.1

部件位置	可检测部件	不可检测且关键部件
疲劳寿命与设计寿命比值	3	10

第6节 蠕变

3.6.1 一般要求

3.6.1.1 蠕变失效（或蠕变断裂）是纤维缆在载荷下随着时间的推移发生累积的、不可恢复的伸长的结果。

3.6.1.2 在系泊系统应用中，聚酯缆、芳纶和尼龙在载荷作用下不会发生明显的蠕变，但 HMPE 的主要问题是其蠕变倾向，因此，本节主要针对 HMPE 的蠕变失效进行分析。

3.6.1.3 一般的，在永久系泊系统中需要考虑纤维缆的蠕变；在移动系泊系统中，由于作业持续时间短，其蠕变问题关注较少。

3.6.1.4 影响蠕变的主要因素有平均载荷、载荷持续时间和温度等。

3.6.2 蠕变的影响因素

3.6.2.1 蠕变状态和时间有关，对于蠕变曲线，其应变是时间的函数，如图 3.6.2.1 (1) 所示；其蠕变速率为该曲线的斜率，如图 3.6.2.1 (2) 所示。根据蠕变速率的不同行为可以分为三种蠕变状态：

(1) 初级蠕变（状态 I）：在这种状态下发生非晶态重新排列，开始时的高蠕变率在结束时降低到平稳水平。通过使用了弹性和延迟弹性部件，应变是可逆的；

(2) 稳态蠕变（状态 II）：在这种状态下分子链发生滑动。蠕变速率略有增加，因为在恒定载荷下，随着蠕变的继续，纱线应力实际上略微增加。蠕变速率被视为该状态的常数。这种应变称为“塑性蠕变”，是不可逆的；

(3) 第三蠕变（状态 III）：在这种状态下，分子链开始断裂。高应变将导致细丝颈缩，并将增加局部应力，从而进一步加速应变直至断裂。

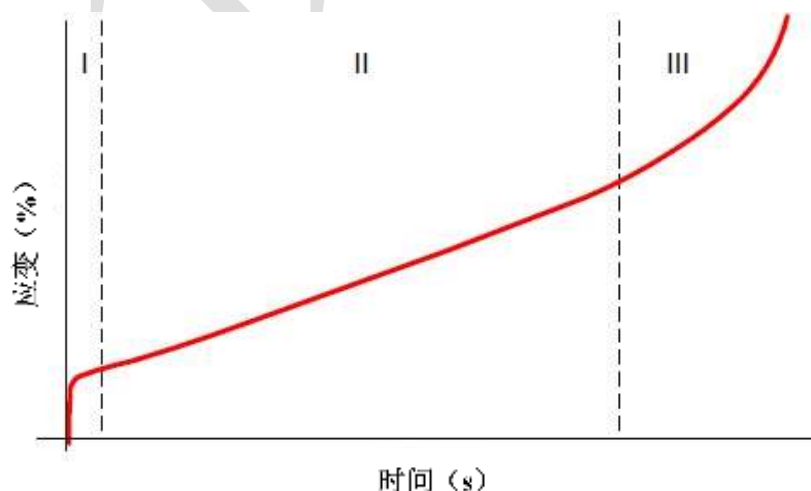


表 3.6.2.1 (1) 典型的 HMPE 蠕变曲线

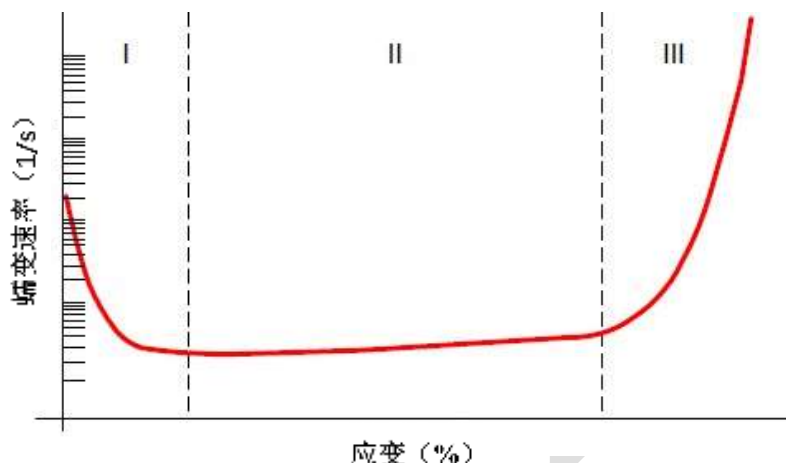


表 3.6.2.1 (2) 典型的 HMPE 蠕变速率曲线

3.6.2.2 蠕变速率还取决于施加的载荷和温度。图 3.6.2.2 给出了一个基于特定的 HMPE 缆的蠕变试验的例子，曲线表明蠕变速率随着载荷和温度的升高而增大。因此，为避免过度蠕变，HMPE 缆应放置在合适的设计水深（温度对水深较为敏感）。

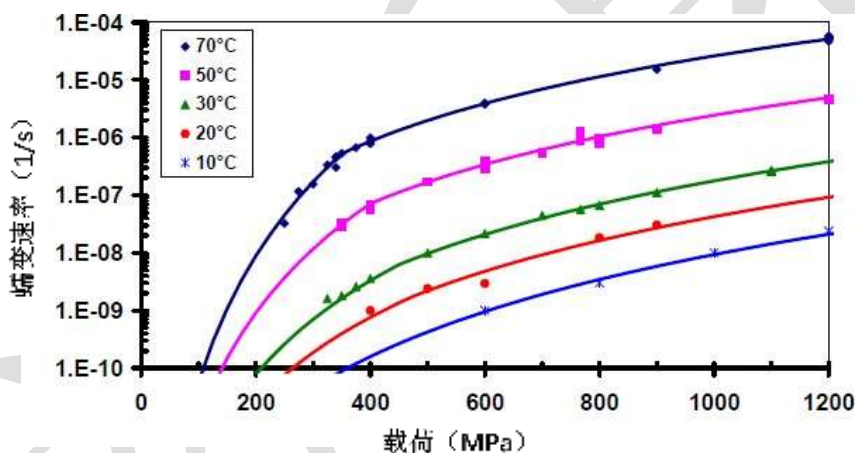


表 3.6.2.2 载荷和温度对蠕变速率的影响

3.6.3 蠕变分析

3.6.3.1 为估算设计使用寿命期间的蠕变应变，应对系泊系统进行蠕变分析。为简化分析，提出以下假设：

- (1) 相较于设计使用寿命而言，蠕变状态 I 的持续时间较短，其蠕变可以忽略；
- (2) 状态 II 的蠕变采用恒定蠕变速率随时间估算，但其蠕变速率仍为载荷和温度的函数；
- (3) 蠕变速率为纱线应力和温度的函数，其可以通过纱线试验和蠕变模型获得；
- (4) 与缆绳设计和单位质量相关的资料信息容易获得，因此纱线应力可以通过特定缆绳的转换因子转换为绳索张力(% MBS)；
- (5) 状态 II 的应变定义为不可逆的塑性蠕变，因此蠕变是可以累积的。对于特定温度，年累积蠕变应变 G_i 可由下式计算：

$$G_i = \sum h_i H_i$$

式中： h_i ——张力区间 i 内的每年持续时间；

H_i ——张力区间 i 内的蠕变速率。

3.6.3.2 蠕变分析的步骤如下：

- (1) 长期的环境事件可以用若干离散的设计工况表示。每个设计工况由一个参考方向

和一个参考海况组成,其特征参数是有义波高、谱峰周期、谱峰因子、流速和风速。应设定每个设计条件的发生概率;

(2) 对于每个设计工况,需要确定所有系泊缆的平均张力;

(3) 通过 3.6.3.1 (5) 中的计算公式计算一个设计条件(一个方向的海况)的年蠕变应变;

(4) 重复步骤(3),计算各海况和方向的年蠕变应变 G_i ,即所有海况和方向的蠕变应变之和;

(5) 设计使用寿命 M 的系泊缆总蠕变应变预测值为:

$$G = MG_i$$

3.6.4 蠕变断裂分析

3.6.4.1 为估算系泊系统的蠕变断裂寿命,应对系泊系统进行蠕变断裂分析。如果监测到蠕变,蠕变断裂寿命应大于设计使用寿命的 5 倍;如果没有监测到蠕变,蠕变断裂寿命应大于设计使用寿命的 10 倍。为简化分析,提出以下假设:

(1) 相较于设计使用寿命而言,蠕变状态 III 的持续时间较短,因此开始出现状态 III 时,则可以认为开始发生蠕变断裂;

(2) 蠕变速率为纱线应力和温度的函数,其可以通过纱线试验和蠕变模型获得;

(3) 与缆绳设计和单位质量相关的资料信息容易获得,因此纱线应力可以通过特定缆绳的转换因子转换为绳索张力(% MBS);

(4) 年累积蠕变断裂损伤比 B 可由下式计算:

$$B = \sum c_i / C_i$$

式中: c_i ——张力区间 i 内的每年持续时间;

C_i ——张力区间 i 内的蠕变断裂时间。

3.6.4.2 蠕变断裂分析的步骤如下:

(1) 长期的环境事件可以用若干离散的设计工况表示。每个设计工况由一个参考方向和一个参考海况组成,其特征参数是有义波高、谱峰周期、谱峰因子、流速和风速。应设定每个设计条件的发生概率;

(2) 对于每个设计工况,需要确定所有系泊缆的平均张力;

(3) 通过 3.6.4.1 (4) 中的计算公式计算一个设计条件(一个方向的海况)的年蠕变断裂损伤;

(4) 重复步骤(3),计算所有海况和方向的总年蠕变断裂损伤 B_i ,即所有海况和方向的蠕变应变之和;

(5) 系泊缆的蠕变断裂寿命预测值为:

$$L = 1/B_i$$

3.6.5 蠕变模型认证

3.6.5.1 产生蠕变和蠕变断裂分析的设计数据的蠕变模型应根据第 4 章第 10 节规定的程序,通过至少一种载荷和一种温度下的缆绳蠕变速率验证试验进行验证。如果发现分析中使用的设计数据不保守,应使用验证试验结果进行调整,并重复蠕变和蠕变断裂分析。为了正确调整设计数据,可能需要对缆绳蠕变速率进行额外测试。

3.6.6 准静态刚度

3.6.6.1 蠕变对 HMPE 的准静态刚度的影响远高于对聚酯缆的影响。对于 HMPE, 3.4.4.3 的方程应修正为:

$$K_{rs} = \frac{T_2 - T_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 + Ct}$$

式中的参数定义与 3.4.4.3 保持一致。

第7节 扭矩协调性

3.7.1 一般要求

3.7.1.1 在系泊系统分析中，纤维缆与系泊组件（如锚链和钢丝绳）之间的扭矩协调性应加以考虑。

3.7.1.2 系泊组件有两种扭矩类别：

- 1) 计入扭矩分量：在安装或恢复过程中，将扭曲计入到组件中并在组件之间传递；
- 2) 不计入扭矩分量：扭曲可以忽略。纤维缆通常不计入扭矩分量，但可以通过在设计时看作为一个扭矩组件。

3.7.2 永久性系泊系统

3.7.2.1 对于永久性系泊系统，通常将无扭矩纤维缆绳和无扭矩钢制组件一起使用从而得到一种无扭矩系泊缆绳。如果使用了扭矩钢制组件，则在纤维缆绳设计时应有相同的扭转特性，从而保证与钢制组件相匹配。

3.7.3 移动式系泊系统

3.7.3.1 移动式系泊系统一般使用的是扭矩钢制组件，特别是对于深水环境条件，因此对于移动式系泊系统应该特殊考虑。

3.7.3.2 对于移动式系泊系统，行业内比较推荐以下两种设计方法：

- (1) 采用扭矩匹配方法，需要进行扭转匹配试验；
- (2) 不采用扭转匹配方法，如果钢制组件的动态扭转可以在纤维缆绳和钢制组件的连接处得到约束，则在移动式系泊系统设计时可以使用无扭转纤维缆绳。

第8节 长度管理

3.8.1 一般要求

3.8.1.1 应对纤维缆长度进行管理，使其保持在系统内的适当位置。

3.8.1.2 应保持导览器和海床之间所需纤维缆间隙。在设计中，应考虑到由于安装过程中的施工拉伸和附加垫层以及系泊使用寿命期间的可恢复或蠕变伸长而产生的永久伸长量。

3.8.2 长度管理问题

3.8.2.1 本节主要介绍永久性系泊系统的长度管理问题，其部分条款适用于移动式系泊系统。

3.8.2.2 施工伸长主要包含两个重要荷载：安装荷载和最大设计荷载。由这些荷载引起的永久伸长分别称为安装伸长和最大设计伸长。这也被称为纤维缆组件长度，包括纤维缆组件接口。

3.8.2.3 通过起草安装程序，可以估算安装荷载。由于安装荷载而增加的缆绳长度被称为安装伸长。此时，购买长度加上安装拉伸即为系泊缆的安装长度。如果纤维缆的荷载超过安装荷载，例如达到最大设计荷载，则在最大荷载下，纤维缆将永久伸长。系泊设计者需要解决这种永久性拉伸对系泊系统性能的影响。

3.8.2.4 对于永久性系泊系统，纤维缆供应商应计算在安装荷载下满足安装长度所需的纤维缆采购长度。浮体运营商需要制定一个合适的长度管理计划，下面将讨论一些长度管理的问题。

(1) 无长度调整

系泊缆的长度不能调整。例如，对于带有固定耳板而不是导缆孔的浮体。系泊设计者需要解决由于最大设计荷载导致的缆绳伸长对系泊系统使用寿命的影响。

(2) 缩短导缆器段进行长度调整

对于带有导缆孔的浮体，可以通过牵引导缆孔段来调整系泊缆的长度。

(3) 缩短纤维缆长度调整

通过移除纤维缆绳中的长度调整插件来调和系泊缆的长度。系泊设计者和缆绳供应商需要顾及这些调整插入物的长度，并且需要在设计阶段指定移除纤维缆插入物所需的设备（导缆器段的长度和绞车的能力）。

(4) 纤维缆长度变化的影响

纤维缆长度和其他性能的变化一般不会对系泊系统本身造成问题。然而，在不调整缆绳长度的情况下，这些变化会影响系泊系统的定位性能，从而影响其他关键系统的性能，如进出口立管。

第9节 其他环境条件的影响

3.9.1 一般要求

3.9.1.1 大多数纤维缆即使在没有护套的情况下，一般也能抵抗典型海洋环境中遇到的紫外线（UV）辐射和化学品。其他外部原因造成的损坏风险，如在部署过程中的外部磨损和机械损坏，或被工作平台破坏等，可以通过适当的护套、安装方法和工作平台禁区来减少。

3.9.1.2 芳纶和聚酯缆由于水解造成的强度损失不会很明显，除非温度长期高于 30 °C；HMPE 不会因为水解而导致强度下降。

3.9.1.3 另一个环境方面是湿润和干燥后形成的盐晶体。一旦盐结晶形成，首先通过对浸泡在盐水中的纱线进行干燥测试，从而可以看出内部的绳索磨损。因此，建议指定用于海上系泊的纤维缆只应在使用期间完全浸泡在海水中使用的情况下使用。

3.9.2 抗紫外线性能

3.9.2.1 在储存、运输和安装过程中，应保护纤维绳免受紫外线辐射损害的影响。

3.9.2.2 如果在等待安装期间长时间暴露在紫外线辐射下，或者如果在上部几米的水中没有护套或覆盖物的情况下的永久系泊，裸露的芳纶或 HMPE 缆可能会遭受表面纱线的降解。在这种情况下，建议使用不透明的护套或罩子。

3.9.3 海洋生长物

3.9.3.1 一般的，纤维缆的强度损失受海洋生长物的影响较小。海洋生长物对整个系泊系统载荷的影响，主要是使得缆绳在水中的重量和拖曳载荷产生变化。可以采用粒子过滤器防止有害的海洋生长物对承重绳的影响。

3.9.3.2 具有坚硬外壳的海洋生物会在绳套与承载芯之间生长，对纱线造成磨损破坏；柔软的海洋生物会附着在缆绳表面从而影响 ROV 对缆绳的检测能力。

3.9.4 失效时的回弹

3.9.4.1 纤维缆中的相当一部分能量以弹性方式储存在缆绳中，在制定安装程序时应考虑对工作人员和设备的安全影响。

3.9.4.2 回弹可能引起纤维的严重压缩破坏（如芳纶的轴向压缩损坏）。

第10节 移动式系泊系统的考虑

3.10.1 一般要求

3.10.1.1 本章主要适用于永久性系泊系统；对于移动式系泊系统，大部分条款也适用，但鉴于永久性系泊系统和移动式系泊系统存在差异，对于以下条款需注意：

(1) 对顶部和底部的锚链或钢丝绳的要求不同；

(2) 移动式系泊系统的纤维缆绳通常无预张力或预张力较小，这可能会导致纤维缆绳在初期使用时柔性较大，但随着其老化，纤维缆绳变硬，在进行刚度试验和系泊分析时需要对此进行考虑；

(3) 动态刚度和准静态刚度是依赖于平均张力、张力幅值、持续时间和系泊系统的固有周期等参数，由于移动式系泊系统作业持续时间较短，这些参数存在不确定性，一般是通过简单而保守的假设来确定这些参数。

第4章 试验

第1节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 本节提供了纤维缆试验指南，包括纤维缆绳试验和纱线试验。

4.1.1.2 纤维缆生产报告中应提供试验结果和其他信息。

4.1.2 试验程序

4.1.2.1 酌情进行以下纤维缆试验，以确定或证明纤维缆性能：

- (1) 破断载荷试验；
- (2) 伸长率与刚度试验；
- (3) 抗海水泥沙颗粒入侵试验；
- (4) 子绳眼环插接完整性试验；
- (5) 整绳循环耐久性试验；
- (6) 3-T 耐力试验；
- (7) 与钢丝绳的扭矩匹配试验（如适用）；
- (8) 轴向压缩疲劳试验（如适用）；
- (9) 蠕变速率验证试验（如适用）。

4.1.2.2 对于由多个平行子绳制成的大型纤维缆绳，可不对整个缆绳进行测试，而是在多个子绳上进行测试，从而获得下列性能：

- (1) 伸长率与刚度试验；
- (2) 眼环插接完整性试验；
- (3) 抗海水泥沙颗粒入侵试验。

4.1.2.3 纤维缆试验应按照本章或等效的试验程序进行。通常在生产前进行原型试验，部分测试试验可以在生产过程中进行，以保证质量。

第2节 破断载荷试验

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 为了保持一致性，所有的测试（包括循环程序和载荷范围）应使用相同的加载程序进行。

4.2.1.2 破断载荷试验报告中应包含以下信息：

- (1) 断裂力和相应的伸长率；
- (2) 载荷-伸长率图表；
- (3) 断裂的位置和性质；
- (4) 测试条件（如环境温度、湿度和偏差等）。

4.2.2 试样和试验机

4.2.2.1 至少选择5个试样进行测试。

4.2.2.2 试样长度至少为缆绳标称直径的40倍，并且试样应与生产缆绳有相同的端接方式（包括护套或套管）。试样在测试前不应被拉伸至超过其参考破断强度的5%，也不应该在张力下循环或保持。该方法不适用于已经使用过的缆绳的测试。

4.2.2.3 试验机应该具有足够的机床长度、行程、加载速率和加载力的能力，以执行该试验。

4.2.2.4 试验机应有测力和记录装置，且经过公认的独立校准机构校准。一般校准应在一年内完成，并备有校准证书原件供检查，其证书副本应附在检测报告中。破断强度试验的

精度至少为 $\pm 1\%$ 。



图 4.2.2.2 通用试验设置

4.2.3 试验程序

4.2.3.1 试样按以下方式进行测试：

- (1) 以 12~35s 的速率对缆绳从 1%到 50%的参考破断强度循环加载，循环十次；
- (2) 在第 11 次循环中，以 2~30s 的速率对缆绳加载 20%的估计初始张力，直至缆绳断裂；
- (3) 记录断裂力（施加在缆绳上的最大力）和缆绳的断裂位置（如接头之间、接头末端、拼接眼或其他对断裂位置的描述）。

4.2.4 测试结果接受说明

4.2.4.1 试验应测试 5 个完整的缆绳样品，如果所有 5 个断裂载荷均高于设计 MBS，则缆绳的 MBS 将被接受。

4.2.4.2 如果一个缆绳的断裂载荷低于 MBS，则应进行调查以确定原因。如果调查表明发生了独立事件，则可以再测试两个试样，如果两个试样的断裂载荷均高于设计 MBS，则缆绳的 MBS 将被接受。

4.2.4.3 如采用其他实验程序，应及时提交支持试验和数据分析方法可靠性的文件，并经 CCS 验船师认可。

第 3 节 伸长率与刚度试验

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 为了保持一致性，所有的测试（包括循环程序和载荷范围）应使用相同的加载程序进行。

4.3.2 试样和试验机

4.3.2.1 至少选择 3 个试样进行测试。

4.3.2.2 试样长度至少为 5m。试样在测试前不应被拉伸至超过其参考断裂强度的 5%，也不应该在张力下循环或保持。

4.3.2.3 试样在试验前在水中至少浸泡 4 小时，试验期间应加水保持试样整体湿润。

4.3.2.4 试验机应该具有足够的机床长度、行程、加载速率和加载力的能力，以执行该试验。

4.2.2.5 试验机应有测力和记录装置，且经过公认的独立校准机构校准。一般校准应在一年内完成，并备有校准证书原件供检查，其证书副本应附在检测报告中。伸长率试验的精度至少为 $\pm 10\%$ 。

4.3.3 安装预紧试验

4.3.3.1 该试验在静态刚度试验之前进行，预张紧操作可以在安装过程中尽可能的去除缆绳的永久伸长和增加缆绳的刚度。

4.3.3.2 试样按以下方式进行测试:

- (1) 将缆绳拉近至 1% 的参考破断强度, 测量并记录初始长度;
- (2) 将张力增加到规定的预张力, 并保持至少 2 小时。记录第 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率;
- (3) 将张力增加到规定的预紧张力 (最大安装张力), 并保持 2 小时。记录第 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率;
- (4) 将张力降低至预张力, 并保持至少 6 小时。记录第 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率;
- (5) 将张力降低至 1% 的参考破断强度, 并保持至少 2 小时。记录第 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率。

以上步骤 (1) 结束到步骤 (4) 结束的长度差异为由于安装后的永久伸长率。

4.3.4 安装后缆绳的准静态刚度试验

4.3.4.1 该试验应在已进行安装预紧试验的试样上进行。

4.3.4.2 试样按以下方式进行测试:

- (1) 将缆绳张力从 1% 的参考破断强度增加到预张力, 并保持至少 100 分钟。记录 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长;
 - (2) 以每分钟约 10% 的参考破断强度的速率将张力从预张力增加到 30% 的参考破断强度, 并保持至少 2 小时。记录第 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率;
 - (3) 以每分钟约 10% 的参考破断强度的速率将张力从 30% 增加到 45% 的参考破断强度, 并保持至少 2 小时。记录第 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率;
 - (4) 以每分钟约 10% 的参考破断强度的速率将张力从 45% 增加到 60% 的参考破断强度, 并保持至少 2 小时。记录第 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率;
 - (5) 以每分钟约 10% 的参考破断强度的速率将张力从 60% 的参考破断强度降低到预张力, 并保持至少 200 分钟。记录 1、10 和 100 分钟以及最后的缆绳伸长率。
- 该测试的数据可用于确定安装后缆绳的准静态刚度。

4.3.5 使用后缆绳的准静态刚度试验

4.3.5.1 该试验应在已进行安装后缆绳的准静态刚度试验的试样上进行。

4.3.5.2 试样按以下方式进行测试:

- (1) 以每分钟大约 10% 的参考破断强度的速率将张力从预张力增加到 65% 的参考破断强度, 并在此张力下保持 100 分钟。记录 1、10 和 100 分钟时的伸长率;
 - (2) 进行 1000 次动态负载循环, 张力范围为 35% 至 65% MBS, 每个周期为 12 至 35 秒;
 - (3) 在最后一个循环中, 以每分钟大约 10% 的参考破断强度的速率将张力从 65% 的参考破断强度降低到预张力, 并在此张力下保持 100 分钟。记录 1、10、100 分钟时的伸长率;
 - (4) 进行上述试验步骤后, 重复 4.3.4 安装后的准静态刚度试验步骤。
- 该测试的数据可用于确定使用后缆绳的准静态刚度。

4.3.6 动态刚度试验

4.3.6.1 该测试用于确定缆绳在不同平均张力和张力范围下的动态刚度 (在波浪频率 (WF) 和低频载荷 (LF) 下)。

4.3.6.2 该试验应在已进行使用后缆绳的准静态刚度试验的试样上进行 (如 4.3.5 所述)。

4.3.6.3 试样按以下方式进行测试:

- (1) 在预张力和 55% 的参考破断强度之间循环 10 次, 周期为 12 至 35 秒, 然后恢复预张力并保持至少 100 分钟;
- (2) 对于每个 WF 测试区间 (12 到 35 秒周期), 绳索在 T_{min} 和 T_{max} 之间循环 40 次; 以至少 1 Hz 的频率记录载荷和伸长率;
- (3) 对于每个 LF 测试区间 (250 秒周期), 绳索在 T_{min} 和 T_{max} 之间的张力下循环 20 次; 以至少 0.25 Hz 的频率记录载荷和伸长率;

(4) 聚酯缆试样参考以下测试矩阵进行测试, 该测试矩阵适用于广泛的缆绳系泊应用:
一般聚酯缆绳系泊应用的动态刚度测试矩阵 表 4.3.6.3

序号	平均载荷 (%MBS)	载荷幅值 (%MBS)	最小载荷 (%MBS)	最大载荷 (%MBS)	周期 (s)	循环次数 (次)
1	15	5	10	20	250	20
2	20	3	17	23	12 to 35	40
3	20	3	17	23	250	20
4	23	16	7	39	250	20
5	30	16	14	46	12 to 35	40
6	30	16	14	46	250	20
7	30	28	2	58	250	20
8	35	8	27	43	12 to 35	40
9	35	8	27	43	250	20
10	40	30	10	70	12 to 35	40
11	40	30	10	70	250	20
12	50	20	30	70	12 to 35	40
13	50	20	30	70	250	20
14	60	10	50	70	250	20

4.3.6.4 动态刚度通过如下方式确定:

(1) 动态刚度应使用循环的峰谷点通过 3.4.3.2 的刚度公式计算, 应变应基于循环期间的平均缆绳长度;

(2) 对于每个测试区间, 计算每个循环的动态刚度, 并报告最后三个循环的平均刚度作为测试区间的动态刚度。

第 4 节 抗海水泥沙颗粒入侵试验

4.4.1 一般要求

4.4.1.1 海底预置缆绳和意外掉到海底的缆绳再利用需要进行此项测试。阻止颗粒进入纤维缆通常采用护套或防沙层来实现。本试验同时适用于护套和防沙层的试验。

4.4.2 试样

4.4.2.1 至少选择 2 个试样进行测试。

4.4.2.2 试样的要求如下:

(1) 试样的长度至少为缆绳标称直径的 5 倍。如若全尺寸试验不能在室内进行, 可以进行缩尺试验, 但其缩尺后的直径不能小于原缆绳直径的 1/2;

(2) 试样的表面应完全被与生产绳相同的过滤层和护套覆盖, 且其厚度不大于生产绳的厚度;

(3) 试样的端部应防水密封。

4.4.3 试验程序

4.4.3.1 试样按以下方式进行测试:

(1) 试验应置于高压舱内并完全浸没在水中;

(2) 试样浸入后, 应在大气压下保持 1 小时;

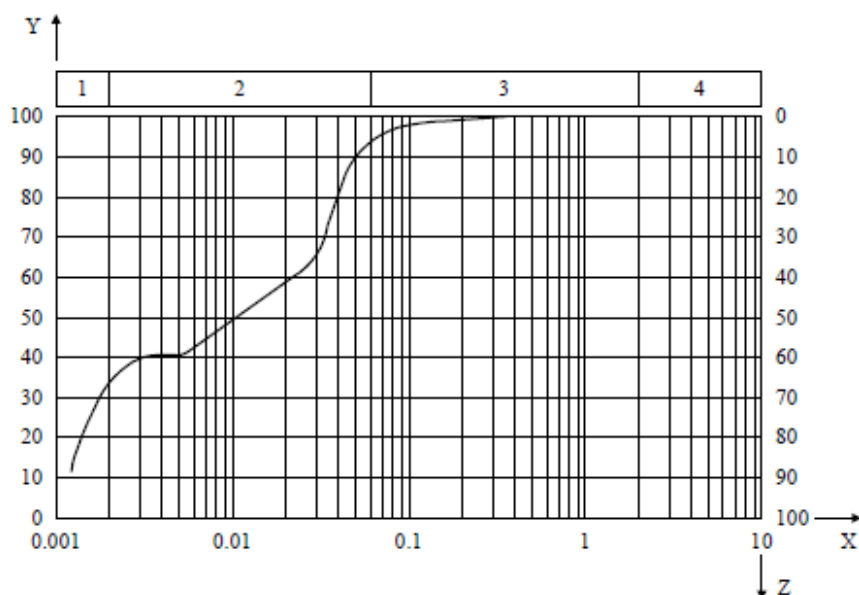
(3) 将土壤以 25% 的水重添加到水中, 土壤分级应包含 30%-40% 的黏土 (小于 2 微米), 以及 50%-60% 的淤泥 (2 到 63 微米), 土壤分级示例如图 4.4.3.1 所示;

(4) 将压力增加到 10MPa, 在缆绳试样上施加水平 (前后) 和垂直 (提起和放下) 运动 (最小 1 米) 至少 20 次, 以模拟安装过程中的缆绳运动和掉落过程。模拟结束后, 缆绳应在舱内保持 72 小时;

(5) 最后释放压力并将试样取出;

(6) 试样取出后应对样品进行解剖, 去除过滤层和护套, 并拍照记录该过程;

(7) 在扫描电子显微镜 (SEM) 下检查缆绳承载芯的纱线样品, 检测土壤颗粒的存在, 缆绳内部纱线中不应该含有直径大于 5 微米的土壤颗粒。



1 黏土 $\leq 2 \mu m$; 2 个泥沙 $> 2 \mu m$ 且 $\leq 63 \mu m$; 3 砂 $> 63 \mu m$ 且 $\leq 2 mm$; 4 个砾石 > 2 毫米且 ≤ 63 毫米; X 粒径 (mm), Y 合格率 (%), Z 保留百分比 (%)

图 4.4.3.1 土壤分级示例

第5节 子绳眼环插接完整性试验

4.5.1 一般要求

4.5.1.1 眼环插接完整性试验的目的是证明对于实际的缆绳, 眼环在铺设后不会移动, 并且在使用足够长的时间后最终不会被拉出。为了保持一致性, 所有的测试 (包括循环程序和载荷范围) 应使用相同的加载程序进行。

4.5.1.2 眼环插接完整性试验报告中应包含以下信息:

- (1) 测试条件 (如环境温度、湿度和偏差等);
- (2) 记录循环 1 - 10、循环 20、50、100、200、300、400、500、600、700, 800 和循环 900-1000 的载荷与“销柱-销柱间距离”拉伸曲线。如果测试继续, 则进一步记录循环 1100, 1200 等, 直到测试停止, 此时应记录一系列每 100 个循环;
- (3) 记录循环周期的峰值伸长, 以证明渐进行为, 如图 4.5.1.2 所示;
- (4) 测试过程的缆绳和测试设备电脑软件显示的照片文件。

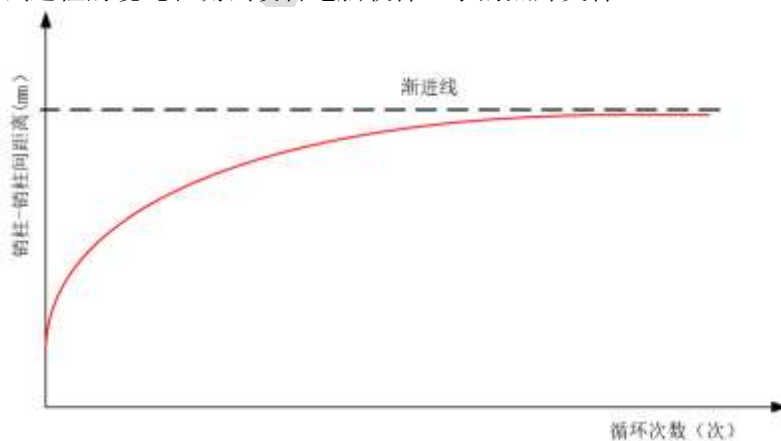


图 4.5.1.2 缆绳循环测试过程中“销柱-销柱间距离”出现渐进行为以显示眼环插接已锁定

4.5.2 试样和试验机

4.5.2.1 至少选择 3 根子绳试样进行测试, 试样子绳眼环插接方式需要与整绳相同。

4.5.2.2 试样应安装在试验机中的光滑钢销柱上。

4.5.2.3 试验机应该具有足够的机床长度、行程、加载速率和加载力的能力, 以执行该试验。

4.5.2.4 试验机应有测力和记录装置, 且经过公认的独立校准机构校准。一般校准应在一年内完成, 并备有校准证书原件供检查, 其证书副本应附在检测报告中。

4.5.3 试验程序

4.5.3.1 试样按以下方式进行测试:

(1) 载荷范围为 5% - 50% MBS, 至少进行 1000 次循环;

(2) 如果在最初的 1000 次循环中测试缆绳的载荷与“销柱-销柱间距离”的拉伸曲线未出现渐进行为, 则需继续进行循环测试;

(3) 记录测试过程中载荷与“销柱-销柱间距离”的拉伸曲线。

4.5.4 测试结果接受说明

4.5.4.1 如果测试缆绳在循环过程中载荷与“销柱-销柱间距离”的拉伸曲线切线逐渐水平, 出现渐进行为, 则缆绳眼环插接完整性试验完成。

4.5.4.2 如果测试循环过程中, 缆绳眼环插接部位滑出, 或载荷与“销柱-销柱间距离”的拉伸曲线未出现渐进行为, 则样品眼环插接完整性测试失败。

第 6 节 整绳循环耐久性试验

4.6.1 一般要求

4.6.1.1 为了保持一致性, 所有的测试(包括循环程序和载荷范围)应使用相同的加载程序进行。

4.6.1.2 整绳循环耐久性试验报告中应包含以下信息:

(1) 测试条件(如环境温度、湿度和偏差等);

(2) 载荷范围及循环次数;

(3) 载荷-伸长率图表;

(4) 测试结束, 整绳内部子绳情况: 是否有粘连、损坏现象等。

4.6.2 试样和试验机

4.6.2.1 至少选择 1 根整绳试样进行测试, 测试前缆绳需在水中浸泡至少 12 小时, 测试过程中需对试样进行淋水降温。

4.6.2.2 试样长度至少为缆绳标称直径的 40 倍, 并且试样应与生产缆绳有相同的端接方式(包括护套或套管)。试样在测试前不应被拉伸至超过其参考破断强度的 5%, 也不应该在张力下循环或保持。该方法不适用于已经使用过的缆绳的测试。

4.6.2.3 试验机应该具有足够的机床长度、行程、加载速率和加载力的能力, 以执行该试验。

4.6.2.4 试验机应有测力和记录装置, 且经过公认的独立校准机构校准。一般校准应在一年内完成, 并备有校准证书原件供检查, 其证书副本应附在检测报告中。

4.6.3 试验程序

4.6.3.1 试样按以下方式进行测试, 以下每个循环载荷应在 1 分钟内完成:

(1) 载荷范围为 10% - 50% MBS, 进行 17000 次循环;

(2) 载荷范围为 5% - 55% MBS, 进行 5500 次循环;

(3) 循环结束后, 解剖整绳护套及防沙层, 检查记录缆绳内部纤维磨损情况。

4.6.4 测试结果接受说明

4.6.4.1 测试循环结束后，整绳内部子绳不允许有熔断或严重粘连损坏的情况，如果有该情况出现，则缆绳测试失败。

第 7 节 3-T 耐力试验

4.7.1 一般要求

4.7.1 3-T 性能的目的是测量缆绳在失效前维持高载荷水平（低于最小破断强度）的时间。为了保持一致性，所有的测试（包括循环程序和载荷范围）应使用相同的加载程序进行。

4.7.2 试样和试验机

4.7.2.1 对于纤维缆绳，通常在两种不同的张力水平下至少测试 5 根新的子绳与 5 根经过整绳循环耐久性试验解剖提取出来的子绳。

4.7.2.2 如果测试是在空气中进行的，则不应预先浸泡缆绳，以在测试期间保持温度稳定。最好在温度调节过的水或空气中进行测试。对于系泊应用，推荐的基本测试温度为 20℃。

4.7.2.3 试验机应该具有足够的机床长度、行程、加载速率和加载力的能力，以执行该试验。

4.7.2.4 试验机应有测力和记录装置，且经过公认的独立校准机构校准。一般校准应在一年内完成，并备有校准证书原件供检查，其证书副本应附在检测报告中。

4.7.3 试验程序

4.7.3.1 试样按以下方式进行测试：

- (1) 将试样安装在试验机上；
- (2) 试样进行 10 次载荷 1%MBS-50%MBS 的循环；
- (3) 将试样加载到指定的载荷并保持载荷恒定，记录载荷与时间的图像；
- (4) 测量从达到指定载荷到缆绳发生破断的时间。

4.7.4 测试结果接受说明

4.7.4.1 为了建立 3-T 设计曲线的斜率，需要至少两个载荷水平下的破断时间。

4.7.4.2 建议选择合适的高载荷水平，使测试时间控制在 4 天内。

4.7.4.3 测量获得在不同载荷水平下缆绳的断裂的时间，数据处理恒定载荷 F 下的断裂时间 (TTR) 根据： $F = B - A \cdot \log_{10}(TTR)$ ，导出处理数据获得系数 A 和 B。以此公式估算缆绳在高载荷下的使用寿命。

第 8 节 与钢丝绳的扭矩匹配试验

4.8.1 一般要求

4.8.1.1 当考虑纤维缆绳与扭矩钢丝绳（6 股或 8 股）连接的永久性系泊系统时，需要进行扭矩匹配试验，以验证纤维缆绳和钢丝绳之间的扭矩特性是相容的。

4.8.2 试样

4.8.2.1 纤维缆绳的试样长度应与钢丝绳的试样长度一致。

4.8.3 试验程序

4.8.3.1 试样按以下方式进行测试：

- (1) 取等长的纤维缆绳和钢丝绳试样，将其连接并布置在两端固定的试验机上；
- (2) 试样加载至 2%钢丝绳 MBS，测量两绳的长度以及钢丝绳的捻距；

- (3) 试样在钢丝绳的 2%~20%MBS 之间以 20~30s 的周期循环 10 次；
- (4) 试样保持在 20%钢丝绳 MBS；
- (5) 试样在钢丝绳的 10%~30%MBS 之间以 20~30s 的周期循环 10 次，并记录每个循环的连接处的旋转角。

4.8.4 测试结果接受说明

- 4.8.4.1 通过上述试验程序测得的钢丝绳每捻长度的平均旋转角度不应超过 5°。

第 9 节 轴向压缩疲劳试验

4.9.1 一般要求

4.9.1.1 本试验主要针对芳纶及类似缆绳的测试，以证明芳纶及类似缆绳具有足够的抗轴向压缩疲劳破坏的能力。

4.9.2 试样

- 4.9.2.1 试样长度至少为缆绳标称直径的 40 倍。

4.9.3 试验程序

- 4.9.3.1 试样应按以下方式进行测试：

- (1) 将缆绳从 1%MBS 的低谷张力循环到 20%MBS 的峰值张力，每周期小于 1 分钟，至少循环 2000 次；
- (2) 拉断缆绳，采用 4.2.3 节的试验方法，测定残余强度。

4.9.4 测试结果接受说明

- 4.9.4.1 通过上述试验得到的残余强度应大于 95%MBS。

第 10 节 蠕变速率验证试验

4.10.1 一般要求

4.10.1.1 该测试仅适用于 HMPE 缆绳，旨在证明生成用于 HMPE 蠕变分析和蠕变断裂分析 (3.6) 的蠕变数据的蠕变模型是合适的。

4.10.1.2 蠕变试验应在受控温度条件下进行，在测试期间，温度应尽可能保持恒定，控制温度波动范围在 5°C 内。

4.10.1.3 应记录环境温度和湿度。测试应选择不超过 25°C 的测试温度；应选择不超过 55% MBS 的张力。

4.10.2 试样

- 4.10.2.1 通常在两种不同的张力水平下至少测试 4 根新的子绳。

4.10.3 试验程序

- 4.10.3.1 试样按以下方式进行测试：

(1) 测试应在恒定负载和恒定温度下进行，应选择与应用缆绳的项目相关的载荷水平和温度，以便可以有把握地确定状态 II (3.6.2.1) 中的蠕变速率；

(2) 持续时间应使样品在至少 24 小时内显示出恒定的蠕变速率，并且载荷水平和温度应在持续时间内尽可能保持恒定。应至少每小时记录整个持续时间内的载荷和伸长率；

(3) 蠕变速率是从测试结束时（例如最后 24 小时）的应变与时间数据获得的，应与蠕变模型针对特定负载和温度生成的蠕变速率进行比较；

(4) 还应报告在状态 I 期间测量的总应变。

第 11 节 纱线试验

4.11.1 一般要求

4.11.1.1 在纤维缆制造前, 应进行纱线试验。

4.11.2 纱线干态破断载荷和伸长率试验

4.11.2.1 应取四个基本纱线样品并进行测试。样品应在 15℃至 25℃的温度, 60%至 70%的相对湿度下进行测试。

4.11.2.2 试样应按照公认的标准或等效方法施加载荷直至断裂, 并记录纱线的平均干破断载荷和干伸长量。测试的方法应在设计文件中予以说明, 并在每次纱线测试时采用同样的方法。

4.11.3 纱线-纱线耐磨试验

4.11.3.1 纱线-纱线耐磨试验按照公认的标准或等效方法进行测试。

第5章 海上安装

第1节 一般规定

5.1.1 一般要求

5.1.1.1 纤维缆的储存、运输和安装作业应按批准的文件和程序进行，文件和程序的编制应按照储存、运输和安装工艺各个阶段作业中所承受的载荷进行分析、计算和校核，使纤维缆在操作与处理中所承受的载荷和弯曲半径都保持在设计允许的范围内。

5.1.1.2 纤维缆的储存、运输和海上安装除应满足本章的技术要求，还应符合 API RP 2SM 第9章和 API RP 2I 第5章的相关适用规定。

5.1.1.3 纤维缆在储存和运输过程中应采取必要措施以防止阳光照射及纤维绳受潮。且环境温度不应超过相应纤维绳的许用温度。

5.1.1.4 纤维缆一般采用滚筒缠绕的方式进行储存、运输和安装，在纤维缆缠绕到滚筒的过程中及运输过程中应采取必要措施以防止纤维缆与滚筒发生摩擦而损坏纤维缆。

5.1.1.5 应注意端头处的弯曲半径不应小于厂商规定的最小允许弯曲半径。

5.1.1.6 金属的端头配件应单独缠绕或单独保存以避免损坏纤维缆。

5.1.1.7 应防止异物（砂子等）接触纤维缆。

5.1.1.8 系泊系统纤维缆在海上安装作业期间应遵守设施所在海域和地区的相关安全条例规定。安装前，应向甲方与第三方提交安装程序供审查。安装偏差应在安装程序中规定，并在设计计算中适当考虑。

5.1.1.9 纤维缆的操作过程，包括但不限于纤维缆的运输、装船、倒缆、铺设、回接与张紧等作业。

第2节 储存与运输

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 在选择纤维缆绳的包装、海运和储存系统时应足够谨慎。

5.2.1.2 设计方应对纤维缆绳的生产过程、陆上和海上运输和搬运、堆场储存和分段、安装和回收（如适用）予以重点关注。

5.2.1.3 对于纤维缆，应配备纤维缆操作指导说明书，根据指导说明书的要求对纤维缆的储存与运输进行操作，以避免在储存与运输过程中对纤维缆的损坏。储存与运输说明书应至少包含起重要求、缠绕要求、运输要求、存储要求等内容。

5.2.1.4 储存与运输说明书中应详细说明纤维缆绳的搬运限制（例如限制缆绳上的局部和整体受到压力）、最小弯曲半径（例如缠绕等）。对于直径较大的超长缆绳，可能需要将绳索装入特殊储罐中。

5.2.1.5 纤维缆应储存在平坦开阔的场地，防止意外的移动，并且避免靠近热源、火源及化学药剂等危险物。

5.2.1.6 每个纤维缆存储滚筒应清楚标记内容物并提供可追溯性。

5.2.1.7 纤维缆成品包装应使用防风雨材料牢固包裹。

5.2.1.8 在储存与运输过程中，应保护纤维缆不受高温、化学和紫外线辐射损伤的影响。

5.2.1.9 在存放和/或缠绕纤维缆时，应避免使用具有锋利和/或突出边缘的金属件刮擦纤维缆。纤维缆的金属配件应单独包装或单独保存，防止任何纤维缆磨损。

5.2.1.10 纤维缆滚筒的吊装需要专用的吊装撑杆和吊装索具，吊装作业前，需对吊装撑杆与吊装索具进行仔细的检查并正确安装，吊装作业要由经过培训并具有经验的吊装作业人员进行操作，防止纤维缆滚筒吊装过程中坠落。

第3节 海上安装

5.3.1 一般要求

5.3.1.1 一般应尽量减少纤维缆与海床的接触，但在某些安装情况下，在与浮式结构物连接之前，有必要预铺设系泊缆。如果纤维缆通过了抗海水泥沙颗粒入侵试验，则允许在海底预铺纤维缆。

5.3.1.2 应制定完整详细的系泊系统安装和回收（如适用）程序用于纤维缆绳的安装和回收操作。

5.3.2 海洋环境工况

5.3.2.1 纤维缆系泊系统海上安装作业一般受海况与天气限制，应对作业区域预期的海洋环境工况进行详尽的评估以确保有足够的窗口期进行施工作业。

5.3.2.2 纤维缆系泊系统海上安装包含多项作业，每项作业有各自的允许环境工况。

5.3.3 施工现场调查

5.3.3.1 安装前，潜水员或水下机器人应对安装现场及其附近区域进行勘测，验证安装现场的海床状况，以确认没有障碍物或碎片；应具备现场障碍物清除的应急程序。在计划编制过程中，应充分考虑相关现场调研信息。

5.3.4 文件资料审查

5.3.4.1 海上安装作业需要提交送审的文件包括但不限于：

- (1) 安装作业计划；
- (2) 质量检验计划；
- (3) 风险分析；
- (4) 预调查程序；
- (5) 定位程序；
- (6) 安装程序；
- (7) 后调查程序；
- (8) 甲板布置图；
- (9) 装船布置图；
- (10) 吊装索具布置图；
- (11) 装船计算分析；
- (12) 吊装计算分析；
- (13) 安装计算分析。

5.3.5 资料提交

5.3.5.1 安装完成后，应整理和提交相关资料，包括施工资料、ROV影像资料、定位资料、完工报告等，并确保提交的资料齐全并符合要求。

5.3.6 铺设

5.3.6.1 纤维缆铺设程序应提交审查的包括但不限于以下内容：

- (1) 纤维缆装船、倒缆方案；
- (2) 纤维缆铺设方案；
- (3) 纤维缆预张紧方案（如适用）；
- (4) 纤维缆湿存方案；
- (5) 纤维缆铺设分析；
- (6) 应急预案。

5.3.6.2 在按照批准的程序对纤维缆进行铺设之前，应进行以下预调查工作：

- (1) ROV对所有已安装结构进行目视检查，如锚桩/吸力锚、快速母接头和系泊基础竣

工条件等；

(2) 检查现有水下基础设施状态，记录现场预安装的任何海底基础设施，并验证位置，以确保在纤维缆铺设期间不会发生碰撞；

(3) 用 ROV 对纤维缆铺设和湿存路线进行目视调查，并应沿着每条铺设和湿存路线进行声纳扫描，调查过程中发现的任何异常或碎片应报告；在可行的情况下，应绘制、记录和清除这些异常。

5.3.6.3 通常，安装操作取决于正在安装的系泊系统、可用的安装设备、天气和现场条件。在纤维缆系泊现场铺设期间，应按顺序开展以下各项内容：

- (1) 现场安装开始之前，要进行施工资源的动员与设备的测试工作；
- (2) 准备工作完成后，按照批准的程序对纤维缆系泊系统进行铺设；
- (3) 在铺设过程中，应进行以下现场测试和测量（如适用）：
 - ① 定位测量系统校准和验证；
 - ② 纤维缆触底测量；
 - ③ 纤维缆扭转测量。

5.3.6.4 海上安装应根据纤维缆操作指导说明书，以尽量减少装卸和安装过程中的损坏，在海上铺设期间需注意如下事项：

(1) 在纤维缆倒缆与铺设之前，应检查设备与纤维缆倒缆及铺设路径上的所有潜在接触面和锐边，以确保没有可能损坏纤维缆的区域；

(2) 应为纤维缆提供甲板保护，并在滚筒和绞车上缠绕聚乙烯绳/或覆盖 PE 箔，以保护纤维绳不受锋利边缘的影响；

(3) 一般应尽量减少纤维缆与海床的接触，但在某些安装情况下，在与浮式结构物连接之前，有必要预铺设系泊缆。如果纤维缆通过了抗海水泥沙颗粒入侵试验，则允许在海底预铺纤维缆。

(4) 纤维缆铺设路由的布置方式应避免摩擦、切割或过度弯曲物造成的损坏。

5.3.6.5 铺设后调查

ROV 对预铺设的纤维缆系泊系统进行铺设后调查，记录系泊缆在海底的路由。ROV 进行纤维缆扭转调查，若扭转超过接受标准，需采取应对措施释放纤维缆的扭转。

5.3.7 回接

5.3.7.1 系泊缆回接程序应提交审查的包括但不限于以下内容：

- (1) 平台限位方案；
- (2) 纤维缆回接方案；
- (3) 纤维缆张紧方案；
- (4) 平台限位计算分析；
- (5) 纤维缆回接计算分析；
- (6) 纤维缆张紧计算分析；
- (7) 应急预案。

5.3.7.2 在与平台连接前，使用目视测量和声纳扫描在指定位置进行调查，并提供完整的安装前调查报告，调查内容包括：

- (1) 锚桩、快速接头（如适用）和纤维缆竣工状态；
- (2) ROV 将对所有安装项目进行目视检查；
- (3) 纤维缆打捞回收索具状况；
- (4) ROV 进行目视调查纤维缆系泊连接路由并沿每条纤维缆路由进行声纳扫描；
- (5) 现场预安装的任何水下基础设施，必须注明并核实位置，确保系泊缆连接期间没有碰撞；

(6) 识别任何海底异常或碎屑。

5.3.7.3 纤维缆系泊系统回接前，应进行以下工作：

(1) 需确保有足够的天气窗口，能保证完成一定数量的纤维缆回接，使平台进入安全稳定状态。

(2) 需进行平台限位测试，限位测试满足回接要求才可进行正式回接作业。

(3) 应合理进行预张紧操作设计，以尽可能地获得永久伸长并增加缆绳刚度，并记录

每一步的预紧力水平、持续时间和绳索伸长，与设计值进行比较；

(4) 要进行施工设备安装与测试工作。

5.3.7.4 在纤维缆系泊现场回接期间，应确保有符合施工要求的天气和现场条件，并按顺序开展以下各项内容：

(1) 按照批准的程序对纤维缆系泊系统进行回接；

(2) 在全部纤维缆系泊完成首次回接之后，开始进行提拉张紧。平台在提拉过程中尽可能地保持平衡状态（小倾角），通常采用分段提拉法进行对角提拉张紧。

5.3.7.5 纤维缆系泊系统全部回接完成后，应进行下列检查：

(1) 潜水员水下利用倾角仪测量全部系泊缆的顶链倾角，同时记录平台的吃水、系泊中心位置等数据；

(2) ROV 对系泊缆进行回接后调查，记录其关键点坐标、扭转数及水下状态。

第6章 在位检查和维保

第1节 一般规定

6.1.1 一般要求

6.1.1.1 系泊系统的业主或操作方应制定纤维缆绳的检查、维护和状态评估计划。该计划应由系泊系统操作方和缆绳制造商与发证检验机构共同制定,以期各方就给定装置的整体安全评估取得一致。

6.1.1.2 在操作过程中,应定期监测系泊缆张力或几何形状,如有必要,应对系泊缆绳进行调整以保持定位性能。

第2节 在位检查

6.2.1 在位检查

6.2.1.1 在位检查包括以下内容:

(1) 在位服役期间,严格监控系泊系统张力监测系统,如果系泊系统在温和的环境下张力变化超过预张力的 $\pm 5\%$,就需要操作锚机调整锚链链环数。具体操作可根据实际项目编写的操维手册执行;

(2) 巡检周期包括:安装完一年、五年、十年,十年后每五年进行一次。经过的台风等级接近设计考虑的级别时,需根据设计或操作维保要求进行巡检;

(3) 如果未经历台风,每五年周期宜进行调整,以抵消纤维缆的蠕变带来的系泊缆松弛;

(4) 应对服役期间的在位监测和检测数据保存记录。

第3节 在位维保

6.3.1 在位维保

6.3.1.1 水下进行系泊系统巡检,发现纤维缆任何破损,及时针对破损范围和深度制定应对措施,包括增加保护、修复和更换决策。检查内容包括:

(1) 整体维保:检测纤维缆海生物生长状态,不推荐对纤维缆海生物进行清理;检查纤维缆的扭转状态。

(2) 眼环维保:检查纤维缆眼环位置是否损坏。如果损坏,建议使用绑扎和三角网进行保护和修复。

(3) 护套:检查护套是否被损坏,并记录护套的损坏程度;如果损坏没有穿透护套,子绳完好,则不需要修理护套;如果损坏穿透护套,但未穿透防沙层,且子绳完好,则视外套的损坏程度,采取相应的修理措施。

(4) 防沙层:检查防沙层是否损坏,如果防沙层损坏但未穿透,需要进行评估并采取

措施。

(5) 子绳:如果防沙层损坏,则应对子绳进行检查。解开距离损坏区域一侧大约 0.3 米的护套,计算并记录损坏的子绳数量,记录损坏子绳的识别标记,评估子绳损坏程度,从而确定是否使用该缆绳。

6.3.1.2 在海上进行维修操作时必须保证完善的设施设备并严格按照权威机构规定程序进行。修复程序应包括:

(1) 缆绳的维修情况说明,以及可以用来恢复缆绳强度的直列式拼接或终端拼接技术;

(2) 外层护套和防沙层损坏可修复情况说明,以及各类设施和设备的修复要求;

(3) 详细记录受损区域的情况;

- (4) 去除缆绳承重部分中有明显磨损的部分；
 - (5) 防止磨损颗粒进一步进入缆绳的承重部分；
 - (6) 确保缆绳在重新布置后不会进一步受到损伤；
- 所有的缆绳修复及直列式接头、终端接头都应保持与新造缆绳相同的质量控制程序。