

指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD01-2018



中国船级社

# 海底管道用金属挠性管检验指南

2018

生效日期：2018年2月1日

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 检验与发证 .....	- 1 -
第 3 节 定义与缩写 .....	- 2 -
第 4 节 接受标准 .....	- 8 -
<b>第 2 章 设计图纸审查</b> .....	<b>- 9 -</b>
第 1 节 一般规定 .....	- 9 -
第 2 节 功能要求 .....	- 9 -
第 3 节 环境条件 .....	- 9 -
第 4 节 载荷工况 .....	- 10 -
第 5 节 设计方法 .....	- 12 -
第 6 节 设计准则 .....	- 13 -
第 7 节 材料选择 .....	- 15 -
第 8 节 结构设计 .....	- 16 -
第 9 节 使用寿命分析 .....	- 19 -
第 10 节 系统设计 .....	- 19 -
<b>第 3 章 材料检验</b> .....	<b>- 24 -</b>
第 1 节 材料性能要求 .....	- 24 -
第 2 节 材料性能试验 .....	- 27 -
第 3 节 原材料质量控制 .....	- 29 -
<b>第 4 章 原型试验</b> .....	<b>- 31 -</b>
第 1 节 一般规定 .....	- 31 -
第 2 节 标准试验 .....	- 32 -
第 3 节 特定试验 .....	- 33 -

第 4 节 特性描述试验及其他试验 .....	- 36 -
<b>第 5 章 制造检验 .....</b>	<b>- 37 -</b>
第 1 节 质量保证要求 .....	- 37 -
第 2 节 骨架层 .....	- 37 -
第 3 节 聚合物挤塑层 .....	- 38 -
第 4 节 抗压/抗拉铠装层 .....	- 39 -
第 5 节 保温层 .....	- 40 -
第 6 节 端部配件 .....	- 40 -
第 7 节 需要验证的工艺 .....	- 42 -
第 8 节 制造公差 .....	- 43 -
第 9 节 修补 .....	- 44 -
第 10 节 工厂接受试验 .....	- 44 -
第 11 节 标识 .....	- 45 -
<b>第 6 章 储存、运输与安装检验 .....</b>	<b>- 46 -</b>
第 1 节 储存 .....	- 46 -
第 2 节 运输 .....	- 46 -
第 3 节 安装检验 .....	- 47 -
第 4 节 预调试和调试 .....	- 47 -
<b>第 7 章 在役检验 .....</b>	<b>- 50 -</b>
第 1 节 一般要求 .....	- 50 -
第 2 节 初次检验 .....	- 50 -
第 3 节 年度检验 .....	- 50 -
第 4 节 换证检验 .....	- 51 -
第 5 节 检验结果的处理 .....	- 51 -
<b>第 8 章 回收、再利用及弃置 .....</b>	<b>- 53 -</b>
第 1 节 一般规定 .....	- 53 -
第 2 节 回收 .....	- 53 -

---

第 3 节 再利用 .....	- 54 -
第 4 节 弃置 .....	- 56 -
<b>附录 A 图纸资料 .....</b>	<b>- 57 -</b>
A.1 特征资料 .....	- 57 -
A.2 状态资料 .....	- 58 -
A.3 检测机构及人员资质 .....	- 58 -
<b>附录 B 外部检查 .....</b>	<b>- 59 -</b>
B.1 一般要求 .....	- 59 -
B.2 挠性管的外部检查 .....	- 59 -
<b>附录 C 内部腐蚀与老化监测 .....</b>	<b>- 60 -</b>
C.1 一般要求 .....	- 60 -
C.2 环空监测方法 .....	- 60 -
<b>附录 D 全面检查 .....</b>	<b>- 61 -</b>
D.1 一般要求 .....	- 61 -
D.2 全面检查的方法 .....	- 61 -
D.3 合于使用评价 .....	- 62 -

## 第 1 章 总则

### 第 1 节 一般规定

#### 1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本指南为海底管道用金属挠性管的检验提供依据。

1.1.1.2 对于含有挠性管的海底管道系统, 挠性管部分应符合本指南及接受标准的规定, 挠性管以外的部分应符合本社海洋工程规范及业主规定的规范标准的适用要求。

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 本指南适用于静态的海底管道用挠性管。水下挠性跨接管可参照本指南的适用要求。

1.1.2.2 本指南适用于生产、外输、注入管道用的挠性管, 但不适用于节流压井用途。

1.1.2.3 本指南适用于输送酸性和非酸性介质的挠性管, 介质可包含油、气、水和化学注剂。

1.1.2.4 本指南适用于铠装层为金属材料的非粘结挠性管(以下简称挠性管)。铠装层为非金属材料的非粘结挠性管, 具体要求可参考 API RP 17B(2014)附录 H Composite Armor for Unbonded Flexible Pipe。粘结挠性管可参考 API Spec 17K 的相关要求。

1.1.2.5 本指南不包括挠性管的附属部件, 可参考 API Spec 17L1/ API RP 17L2, 或其他 API 标准。

#### 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 对于具有新型结构和新颖特性的挠性管, 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、制造方或其他机构欲通过风险评估对挠性管进行设计、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 检验与发证

#### 1.2.1 一般要求

1.2.1.1 经业主或其代理人申请, 本社将作为检验方依据本指南和/或业主规定的适用规范及标准, 对用于海底管道的挠性管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。

1.2.1.2 按本指南规定完成检验后的挠性管, 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。

1.2.1.3 为保证对挠性管顺利、及时地进行检验, 申请人应提供适当的检验条件, 包括抵达检验地点的交通工具和其他方便。

### 1.2.2 证件签发

1.2.2.1 由本社验船师按照本指南第2章、第3章（适用时）、第4章的规定，以及本社《钢质海船入级规范》中产品认可的相关要求，通过对海底管道用挠性管的产品设计图纸审查、原型试验和现场审核（如适用），确认满足本指南要求后，可由本社签发相应的认可证书和/或检验文件。

1.2.2.2 由本社验船师按照本指南第2章至第5章的规定，通过对海底管道用挠性管的逐件或逐批检验，确认满足本指南和/或其他接受标准要求后，本社可签发《海上固定设施产品检验证书》和/或检验文件。

1.2.2.3 对于新建的含挠性管的海底管道系统，按照本指南第2章至第6章的规定和本社海洋工程规范及业主规定的规范标准的适用要求，经本社验船师检验合格后，本社可签发《海上设施符合证书》和/或检验文件。

1.2.2.4 对于在役的含挠性管的海底管道系统，由本社验船师按照本指南第7章的规定和本社海洋工程规范及业主规定的规范标准的适用要求，经检验合格后，本社可签发《海上设施符合证书》和/或检验文件。

1.2.2.5 对于已获得本社签发符合证书的含挠性管的海底管道系统，应接受本指南第7章规定的年度检验。经本社检验后认为该系统继续满足要求，则在符合证书上签证，该符合证书将继续有效。

1.2.2.6 对于已获得本社签发符合证书的含挠性管的海底管道系统，从获得《海上设施符合证书》起，在证书有效期到期前，应按照本指南第7章，进行一次换发证书的检验，经检验合格后，可签发新的证书和/或检验文件。

1.2.2.7 对于由业主或其代理人申请回收再利用或弃置的挠性管，由本社验船师按照本指南第8章中的规定，经检验合格后，可签发相应的证书和/或检验文件。

### 1.2.3 保持证件有效的条件

1.2.3.1 凡遇下列情况之一，本社签发的证件即自行失效：

- (1) 当作业者在规定的范围内未遵守挠性管的操作规程，致使该系统遭受重大损坏时；
- (2) 未按期履行本指南规定进行各种检验时；
- (3) 当发现挠性管道系统出现与本指南的要求相背的严重缺陷，而申请人或作业者未报告本社且未进行必要的改进时；
- (4) 凡挠性管道系统发生损坏、改建、修理或重大更换，以及变换输送介质或输送条件有重大改变，而未申请本社进行检验和认可时。

## 第3节 定义与缩写

### 1.3.1 定义

1.3.1.1 本指南中所用定义如下：

#### (1) 挠性管 flexible pipe

也称柔性管或复合软管，指挠性管管体和端部配件的组合物，其中管体各层由不同材料（通常为金属和聚合物材料）组成，可发生较大的挠度变形。

#### (2) 粘结挠性管 bonded flexible pipe

金属加强层被粘结在聚合物中的挠性管。管体中也包含编织材料，作用为增加整管结构强度或分隔聚合物层。

#### (3) 非粘结挠性管 unbonded flexible pipe

由单独的非粘结的聚合物和螺旋缠绕的增强层组成的挠性管,各层之间可以发生相对运动。

#### (4) 粗糙管 rough bore

最内层为骨架层的挠性管。

#### (5) 光滑管 smooth bore

最内层为内压密封层的挠性管。

#### (6) 骨架层 carcass

互锁的金属结构。通常应用在挠性管的最内层(带有内骨架层的挠性管通常称作粗糙管),其作用为防止内压密封层或整管发生压溃,该压溃可能是由于整管卸压、外压、抗拉铠装层产生的向内挤压力或外部机械挤压载荷(如张紧器)等导致的。骨架层也可用在挠性管外层,用于保护挠性管免于外部磨损。

#### (7) 内压密封层 internal pressure sheath

确保内部流体密封的聚合物挤塑层。该层可由多层组成,但不包含牺牲层。

#### (8) 抗压铠装层 pressure armor layer

挠性管的结构层,通常是由有互锁功能的金属钢丝缠绕而成,也可以由扁平钢带螺旋缠绕而成,一般缠绕角度接近90°。主要作用是挠性管提供抵抗内压、外压和机械挤压的能力。对内压密封层起到支撑作用。

#### (9) 抗拉铠装层 tensile armor layer

挠性管的结构层,由金属钢丝螺旋缠绕而成,缠绕角度一般在20°~55°之间,一般为正反两层钢丝缠绕。抗拉铠装层的作用主要是承受拉力载荷,也可承受内压载荷。

#### (10) 保温层 insulation layer

挠性管的附加层,用于提高保温性能,一般位于抗拉铠装层和外包覆层之间。

#### (11) 中间包覆层 intermediate sheath

位于内压密封层和外包覆层之间的聚合物挤塑层,用于:

- (a) 在光滑管中用于阻隔外部流体;
- (b) 耐磨;
- (c) 阻隔外部流体进入保温层,避免保温层吸水和蠕变,从而避免整管热交换系数的降低;
- (d) 当外包覆层破裂导致中间包覆层外部的环空进水后,作为阻隔层避免内部环空进水。

#### (12) 耐磨层 antiwear layer

非金属层,由挤塑的热塑性鞘或带子螺旋缠绕而成,通常用于减少相邻结构层之间的磨损。

#### (13) 防屈曲层 antibuckling tape

一般由聚合物、编织物、纤维或其他能够起到紧固作用的材料构成。该层一般缠绕在抗拉铠装层的外面,紧固/挤压内层的扁钢/钢带,防止其发生径向的鸟笼屈曲变形。

#### (14) 环空 annulus

位于两个挤塑层之间的空间区域,如内压密封层和外包覆层之间,在端部配件处会进行

密封。渗透到环空中的气体和液体通常可以自由的流动和混合。

#### (15) 外包覆层 **outer sheath**

聚合物的挤塑层。用于保护挠性管，防止海水进入内部，也防止其他的外部破坏，如腐蚀、冲蚀或其他机械损坏。该层可以由若干子层组成。

#### (16) 爆破环 **burst disk**

设计位于外包覆层上的薄弱点，在外包覆层上的局部减小厚度。当环空内的压力超过一个特定值，该爆破环即破裂。

#### (17) 端部配件 **end fitting**

挠性管各层的结构终端，在挠性管和连接器之间传递载荷，且对内外流体起密封作用。

#### (18) 附属部件 **ancillary components**

指附在挠性管上，为了实现如下一个或多个功能的部件：

- (a) 控制挠性管的形态；
- (b) 在挠性管和临近结构之间提供结构过渡；
- (c) 避免过度弯曲；
- (d) 将其他结构件连接到挠性管上，或将挠性管连接到另外的结构或法兰上，或针对挠性管的特有连接器（如螺栓、螺母和卡箍等）；
- (e) 为保护或修复挠性管；
- (f) 在 I 形套管/J 形套管内壁与挠性管之间提供一个密封空间（避免其内的海水腐蚀抑制剂流出）。

#### (19) 弯曲限幅器 **bend limiter**

任何用于限制挠性管弯曲的装置，包含弯曲限制器、弯曲加强器和喇叭口等。

#### (20) 弯曲限制器 **bend restrictor**

对挠性管弯曲进行刚性约束的装置。当挠性管的曲率半径达到某最小值即发生锁死，以防止其过弯。

#### (21) 弯曲加强器 **bend stiffener**

附属锥形部件，通常连接在端部配件或支撑构件上，用于局部逐渐增加挠性管的弯曲刚度，使挠性管的弯曲应力和曲率在可接受范围内。

#### (22) 喇叭口 **bellmouth**

导向套管的端口，为喇叭口形状，用于防止挠性管的过度弯曲，使挠性管与套管平顺过渡地接触。

#### (23) 连接器 **connector**

在端部配件和相邻管道系统之间提供一个密封的结构连接装置。连接器包含螺栓法兰、夹毂和其他连接器。这些连接器也可以通过机械或是液压设备由潜水员辅助作业，或是水下无人操作。

#### (24) 静态应用 **static application**

在永久操作期间，挠性管不会遭受到有效的循环变化载荷或形变。

#### (25) 酸性服役 **sour service**

输送介质中含有 $H_2S$ 且其含量已超过NACE MR0175中规定的最小值。特别注意，在管

内腔体是酸性介质应用，但环空内不一定是酸性介质应用。确定腔体内的介质条件时应采用设计压力，确定环空内的介质条件时应采用操作压力。

#### (26) 非酸服役 **sweet service**

输送介质中不含H<sub>2</sub>S或含量低于NACE MR0175中规定的最小值。

#### (27) 弯曲半径 **bend radius**

基于挠性管的中心线测量的整管弯曲半径，包括储存最小弯曲半径和操作最小弯曲半径。

#### (28) 弯曲刚度 **bending stiffness**

挠性管抗弯曲的能力，与挠性管的有效弹性模量和截面惯性矩有关。弯曲刚度随拉力、内压和温度而变化。

#### (29) 挤压载荷 **crushing loads**

管道安装过程中，通过安装设备（如张紧器、立式盘、滑车、托管架、导向辊等）时施加在管道上的局部径向挤压载荷；也包括管道在正常操作工况下处于弯曲和受拉时受到的挤压载荷，如J形套管弯曲、喇叭口和托管架等。

#### (30) 设计拉力 **design tension**

考虑内部介质密度和压力的影响，在安装、操作和回收期间施加在挠性管上的最大拉力载荷。

#### (31) 鳞爆 **fishscaling**

指钢丝或钢带没有平铺在内层之上，通常是由于钢丝/钢带生产缠绕中预成型方式不正确导致的。抗拉铠装层、抗压铠装层和骨架层都可能发生鱼鳞状分布。

#### (32) 侧向屈曲 **lateral buckling**

挠性管的一种失效模式。一般是由反向的盖帽效应或局部动态弯曲引起，表现为抗拉钢丝在侧向或面内的屈曲。

#### (33) 椭圆度 **ovalization**

管截面的不圆度，定义如下：

$$\frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}$$

其中， $D_{\max}$ 和 $D_{\min}$ 分别是管子最大和最小直径。

#### (34) 总传热系数 **overall heat transfer coefficient (OHTC)**

挠性管截面传递热量的总体性能的测试值，指单位面积上温度改变1度时传递的热量。通常以挠性管内表面作为传递热量的基准面。

#### (35) 扭矩平衡 **torsional balance**

挠性管在设计中需保证在轴向和内压载荷作用下，不会因铠装层螺旋结构而引起整管的重大扭曲和扭矩载荷。

#### (36) 正常操作事件 **normal operation event**

按计划的操作事件：正常操作、在位压力测试、连接操作、完整性检测、维护和维修。

#### (37) 异常操作事件 **abnormal operation event**

由于罕见载荷引起的短周期事件，如超过设计压力的压力、意外工况。

**(38) 正常临时事件 normal temporary event**

有限时间内的事件，如运输、安装、回收和现场测试。

**(39) 极端临时事件 extreme temporary event**

由于罕见事件在短时间内发生的事件。如超出操作计划的压力和环境，意外工况。

**(40) 最小压力 minimum pressure**

管道在整个寿命期内（安装和操作）经历的最小压力。保守考虑可以假定为真空。

**(41) 操作压力 operating pressure**

管道服役期间内经历的长期正常操作工况下的内部压力分布。

**(42) 最大操作压力 maximum operating pressure**

参考位置处，管道在长期正常操作工况下经历的内部压力最大值。

**(43) 设计压力 design pressure**

参考位置处，考虑有计划的关井和压力变化冲击下的管道内部最大压力。

**(44) 系统设计压力 system design pressure**

管道系统内最大内部压力的最低值。

**(45) 偶然压力 incidental pressure**

由于异常操作，如计划外关井、冲击压力或者另外的临时的异常工况下，管道经历的最大内部压力。除非业主指定，否则最大偶然压力是 1.1 倍的设计压力。

**(46) 工厂接受试验 (FAT) 压力 factory acceptance test pressure**

挠性管制造完成后，为测试其潜在缺陷而进行压力试验时施加的内压。除业主特殊规定外，用做静态平管段和海底跨接管的挠性管的工厂接受试验压力为设计压力的1.3倍。

**(47) 海上测漏试验 (OLT) 压力 offshore leak test pressure**

海上安装完成后，为了测试密封性而进行压力试验时施加的内压。除业主特殊规定外，OLT的测试压力为管道设计压力与管道系统设计压力两者较小值的1.1倍。

**(48) 船上结构完整性测试压力 on-board integrity test pressure**

在安装船上对管道或管段进行结构完整性测试时采用的内压。除业主特殊规定外，船上结构完整性测试压力与 FAT 压力相同。

当挠性管被完全回收至船上和在安装船上进行修复时，如这些回收和修复操作影响了挠性管加强层或端部配件结构的完整性，要求进行船上结构完整性测试。

**(49) 海上结构完整性测试压力 offshore integrity test pressure**

当管道海上安装完成后，对管道或管段在原位进行结构完整性测试时采用的内压。除业主特殊规定外，海上结构完整性测试压力为管道设计压力与管道系统设计压力两者较小值的 1.25 倍。

当以下两种情况时，要求进行海上结构完整性测试：（1）如挠性管在位状态下进行过修复且加强层或端部配件终端的完整性受到影响；（2）评估挠性管在潜在损伤后或性能下降后的完整性。

**(50) 爆破压力 burst pressure**

当给管道打压时，管体或端部配件无法保持流体密封性时的压力。

**(51) 操作温度 operating temperature**

管道服役期间内经历的长期正常操作工况下的内部温度分布。

**(52) 最大/最小操作温度 maximum/minimum operating temperature**

管道服役期间内经历的长期正常操作工况下的内部最大/最小温度。

**(53) 设计温度 design temperature**

管道服役期间内经历的长期操作工况下的内部最大/最小温度。

**(54) 偶然温度 incidental temperature**

管道服役期间内经历的不太可能超出的最大/最小温度。偶然温度应依据于异常操作工况（包含非计划内的瞬间事件）确定。

**1.3.2 缩写**

CIV	固有粘度修正
DSC	差示扫描量热仪
FAT	工厂接受试验
HDPE	高密度聚乙烯
HIC	氢致开裂
HV	维氏硬度
LPR	线性极化电阻技术
LR	互锁半径
MBR	最小弯曲半径
MDPE	中密度聚乙烯
MPI	磁粉检测
NDE	无损检验
OBR	操作弯曲半径
OHTC	总传热系数
OLT	海上测漏测试
PA	聚酰胺
PE	聚乙烯
PU	聚氨酯
PVC	聚氯乙烯
PVDF	聚偏二氟乙烯
ROV	水下机器人
SCC	应力腐蚀开裂
SIT	结构完整性试验
SR	储存弯曲半径
SSC	硫化物应力开裂
TAN	滴定酸值
TFL	过出油管
TPE	热塑性弹性体

WPS	焊接工艺规程
XLPE	交联聚乙烯

## 第 4 节 接受标准

### 1.4.1 一般要求

1.4.1.1 除满足本指南要求外，对于挠性管的设计、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。

1.4.1.2 如采用其他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。

1.4.1.3 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。

1.4.1.4 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。

### 1.4.2 接受的标准

1.4.2.1 本社接受的挠性管标准如下：

- |     |              |  |
|-----|--------------|--|
| (1) | API SPEC 17J | Specification for Unbonded Flexible Pipe.  |
| (2) | API RP 17B   | Recommended Practice for Flexible Pipe.  |
| (3) | ISO 13628-2  | Petroleum and natural gas industries – Design and operation of subsea production systems – Part 2:Unbonded Flexible pipe systems for subsea and marine applications. |
| (4) | ISO 13628-11 | Petroleum and natural gas industries – Design and operation of subsea production systems – Part 11: Flexible pipe systems for subsea and marine applications.        |

1.4.2.2 本社接受的与挠性管相关的其他标准将在本指南各章节中相应规定。

## 第 2 章 设计图纸审查

### 第 1 节 一般规定

#### 2.1.1 一般要求

2.1.1.1 开工前, 申请单位应将本节规定的图纸资料提交本社进行审查, 详见附录 A 中的设计相关资料。必要时, 本社可要求扩大送审图纸资料的范围。

2.1.1.2 挠性管的设计应符合本指南和业主规定的相关要求。

2.1.1.3 已批准的图纸资料, 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。

### 第 2 节 功能要求

#### 2.2.1 总体功能要求

2.2.1.1 挠性管应至少满足以下总体功能要求:

- (1) 提供密封的通道;
- (2) 能够承受所有设计载荷和所有载荷组合;
- (3) 能够满足使用寿命内的功能要求;
- (4) 各层材料应适用于所处的环境。

2.2.1.2 端部配件作为挠性管的一部分, 除应满足 2.2.1.1 的要求之外, 如适用时, 还应满足:

- (1) 为挠性管与外部支撑结构之间提供结构界面;
- (2) 为挠性管与弯曲限制设备之间提供结构界面。

### 第 3 节 环境条件

#### 2.3.1 内部流体参数

2.3.1.1 内部流体参数至少包括: 内压 (见 2.3.1.2)、温度 (见 2.3.1.3)、流体组分 (见 2.3.1.4)、流体类型和流态、流体参数 (包括流速、液体密度、粘度、最小入口压力和出口压力)、热参数 (即热容)。

2.3.1.2 挠性管的内压数据包括最小压力、操作压力、最大操作压力、设计压力、系统设计压力、偶然压力、工厂接受试验 (FAT) 压力、海上测漏试验 (OLT) 压力、船上结构完整性试验压力、海上结构完整性试验压力。此外, 业主应给出最大增压速率、最大降压速率或者随时间变化的压力历程、极限压力循环次数 (如从最大操作/设计压力到最小操作/设计压力或某个特定的压力, 是否伴随温度循环)。

最小压力可以基于保守考虑为真空。除非业主规定, 最大偶然压力取 1.1 倍的设计压力, 用做静态平管段和海底跨接管的挠性管 FAT 测试压力为设计压力的 1.3 倍, OLT 的试验压力为管道设计压力与管道系统设计压力二者较小值的 1.1 倍, 船上结构完整性试验压力与 FAT 的试验压力相同, 海上结构完整性试验的试验压力为管道设计压力与管道系统设计压力二者较小值的 1.25 倍。

2.3.1.3 业主应给出操作温度、最大/最小操作温度、设计温度、偶然温度及偶然温度的持续时间。

#### 2.3.1.4 流体组分

应至少明确生产流体 (各个阶段的组分)、注入流体及连续的或临时的化学药剂 (剂量、注入时间、浓度和频率)。内部流体规格书中, 应包括如下参数:

- (1) 服役条件的所有参数，包含 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 的分压（或浓度）、有机酸（甲酸、醋酸、丙酸）、液相 pH 值、滴定酸值（TAN）（参照 ASTM D664 或 ASTM D974 规定）、含水量及其离子成分（采出水、海水和游离水）；
- (2) 气体，包括氧、氢、甲烷和氮；
- (3) 液体，包括原油成分、醇类、采出水离子成分；
- (4) 芳香烃成分；
- (5) 腐蚀剂，包括细菌类、氯化物、有机酸和含硫成分；
- (6) 化学注剂，包括醇类和腐蚀、水合物、石蜡、水垢、积蜡（包含溶氧量浓度）的抑制剂；
- (7) 固体物，包括砂粒、沉淀物、水垢、水合物、积蜡和生物膜。

### 2.3.2 外部环境数据

2.3.2.1 外部环境参数至少包括安装位置、水深、海水参数、空气温度、土壤数据、埋设/回填土壤数据、海生物、日照、流参数、波参数、风参数（如适用时），如表 2.3.2.1 所述。

外部环境参数

表 2.3.2.1

参数	内容
安装位置	安装位置的地理数据；
水深	设计水深（管道路由范围内的最大水深），沿管道位置的水深变化和潮汐变化；
海水参数	密度、盐分、pH 值、最高和最低温度；
空气温度	挠性管在储存、安装和操作条件下的最高/最低空气温度；
土壤数据	土壤描述，包括剪切强度、内摩擦角、海床摩擦系数、土壤类型描述（软/硬，砂土/粘土）、导热系数、粗糙度、晶粒大小、土壤稳定性、液化、干/湿下土壤容重、沙波以及以上参数沿路由的变化；
埋设/回填土壤数据	回填或覆盖材料的类型、密度，计算隆起屈曲或者相关计算分析可能用到的相关参数；
海生物	密度和沿水深变化的厚度；
冰	最大积冰，或漂移冰山和浮冰；
日照	在储存和操作状态下暴露的管道长度和时间；
海流参数	考虑水深、方向和重现期，包括已知的局部流的影响；
波浪参数	有义波高和最大波高及相应的周期、波谱，同时考虑方向和重现期；
风参数（如适用时）	考虑不同方向、水面以上高度和重现期。

## 第4节 载荷工况

### 2.4.1 载荷

2.4.1.1 挠性管的设计载荷包括功能载荷（永久载荷和可变载荷）、外部环境载荷和偶然载荷，详见表 2.4.1.1。

常见平管段的载荷类别

表 2.4.1.1

功能载荷
------

(1) 由于挠性管、介质和附件的重力、浮力产生的载荷，包括永久工况和临时工况； (2) 外压； (3) 外部土壤和石块对挖沟、埋设或抛石的管道产生的反作用力； (4) 支撑和保护结构产生的静态反力和变形载荷； (5) 临时安装或回收载荷，包括施加的拉力、挤压载荷、冲击载荷和导向装置引起的载荷； (6) 残余安装载荷，在服役期内作为永久载荷作用于管道结构； (7) 由压力和张力引起的扭转而产生的载荷和位移； (8) 试验压力，包括安装、试运行和维护压力； (9) 管束或背负式管道管卡的相互作用力； (10) 与刚性管或挠性管的交叉所引起的载荷，或悬跨引起的载荷； (11) 安装期间定位误差引起的载荷； (12) 由检测和维修工具引起的载荷； (13) 由多相流段塞产生的载荷，如适用； (14) 由于包装的约束引起的载荷（如 FAT 测试）； (15) 内压； (16) 因压力变化和温度变化引起的载荷；
<b>环境载荷</b>
(1) 由所有表 2.3.2.1 中规定的外部环境参数所引起的载荷；
<b>偶然载荷</b>
由下述事故发生而引起的直接或间接作用于挠性管的载荷和运动： (1) 落物； (2) 拖网撞击； (3) 内部超压； (4) 安装船舱室破损或意外进水； (5) 安装船推进器失效； (6) 安装船动力定位系统失效； (7) 安装船锚链失效； (8) 因水合物堵塞引起的内压差，如适用； (9) 挠性管与其它结构的干涉。

2.4.1.2 应评估作用于挠性管上的包括表 2.4.1.1 中的所有载荷，包括载荷随时间和位置的变化。

## 2.4.2 工况

2.4.2.1 挠性管的设计工况可分为永久操作工况（包括正常操作工况和极端操作工况）、异常操作工况和临时工况，如表 2.4.2.1 所示。

各个工况所对应的载荷组合

表 2.4.2.1

载荷类别	工况				
	操作工况			非操作工况	
	永久		异常	临时	
	正常	极端		正常	极端 <sup>①</sup>
永久功能载荷	各个工况相应的永久功能载荷				
可变功能载荷	最大操作压力	设计压力	≤最大偶然压力	由业主规定压力值	
	最大/最小操作温度	设计温度	≤偶然温度	由业主规定温度值	
外部	依据操作	年发生概	年发生概率	由业主规定重现	由业主规定

环境载荷	计划	率 $\geq 10^{-2}$	$\leq 10^{-2}$	期,若无规定则假定重现期为 3 个月	
偶然载荷	不适用	应考虑的偶然载荷	应考虑的偶然载荷	不适用	应考虑的偶然载荷
联合概率 $P_c$ <sup>②</sup>	相关的功能载荷	年发生概率为 $10^{-2}$	年发生概率 $\leq 10^{-2}$	相关的功能载荷	年发生概率 $\geq 10^{-2}$

注：① 指环境载荷为不可控或者可变功能载荷超出最大偶然压力/偶然温度的工况。

②  $P_c$ ：仅指独立的环境载荷和偶然载荷的载荷组合的年联合概率。

2.4.2.2 根据表 2.4.2.1，定义设计工况（如正常操作工况、极端操作工况、异常操作工况、临时操作工况等）及相应的载荷组合。对于年发生概率小于  $10^{-4}$  的载荷组合，可予以忽略。FAT 工况的载荷组合应根据制造方的 FAT 程序进行规定。对于所有适用工况，挠性管设计应满足在相应载荷组合下的相关设计要求。

2.4.2.3 业主或制造方规定的任何临时工况应进行校核，可能包括试验（工厂接受试验、海上测漏试验、海上结构完整性试验）、安装、弃管、回收、装卸和储存工况。

2.4.3.4 设计工况中应考虑环空完整并浸满凝结水的工况和环空破损后进入海水（不含空气）的工况，并在每个工况中考虑所含有的相应种类气体。如制造方通过设计和计算证明海水进入环空是小概率事件，且经业主同意，则可将环空进入海水（不含空气）作为偶然事件。此外，环空进入海水（含空气）的情况应作为偶然事件。

2.4.2.5 设计基础中应定义每个载荷组合中每个载荷的发生概率。业主可根据项目特定情况定义载荷类别或子类的概率。业主宜给出偶然事件和与安装相关事件的概率值。若业主未规定概率值，制造方应给出单独事件发生概率的建议值。这些规定的概率值应符合表 2.4.2.1 中规定的概率及上述要求。

## 第 5 节 设计方法

2.5.1 挠性管设计方法应至少包括：

- (1) 理论依据，包括挠性管设计参数的计算过程；
- (2) 用于挠性管各层和组件的计算方法；
- (3) 原型试验对理论依据的验证。应包括对挠性管所有结构层性能的验证。对于非关键层（如耐磨层）的简化的保守分析方法，如不影响其它层应力计算的可靠性，则可以接受该方法；
- (4) 钢材应力集中系数的理论依据，包括在端部配件接口处及其内部、夹紧装置处的应力集中，以及因与刚性表面接触、制造公差、载荷引起的间隙而导致的应力集中；
- (5) 制造公差、制造产生的应力或应变、焊接及其它影响结构性能的效应；
- (6) 本章第 9 节要求的使用寿命分析方法的验证；
- (7) 符合表 3.1.2.1 和表 3.1.3.1 要求的各层材料性能；
- (8) 依据第 3 章第 2 节对管体材料和端部配件材料的材料评定。

2.5.2 初始设计方法和任何设计方法的改变，应经本社审查和确认，包括上述规定的各方面内容。

2.5.3 设计方法应考虑所有层受磨损、腐蚀、制造工艺、尺寸变化、蠕变和老化（因机械降解、化学降解或热降解引起）的影响，除非挠性管设计文件证明不受以上因素影响。

2.5.4 表 2.6.1.1 中利用率是基于名义尺寸和寿命结束时的状态。对于金属层，应表明在制造公差内的尺寸变化不会导致利用率超过表 2.6.1.1 中的规定值 3%。

2.5.5 所有金属层的厚度计算应包括磨损裕量和计算使用寿命的平均腐蚀速率。

2.5.6 对于新的设计，应进行充分的原型试验以验证设计方法。

## 第 6 节 设计准则

## 2.6.1 管体设计准则

2.6.1.1 管体各层设计的要求，应采用表 2.6.1.1 中规定的准则。

管体各层设计准则 表 2.6.1.1

管体各层	主要失效模式	设计准则	操作工况			非操作工况		
			永久		异常	临时		
			正常	极端		正常		极端
						安装	测试	
骨架层	压溃 <sup>②</sup>	载荷	0.85					
光滑管内衬层	压溃 <sup>①</sup>	载荷	对于每种聚合物材料，压溃校核的允许使用系数应由制造方规定。					
内压密封层	破裂	减薄 <sup>③</sup>	对于因变形填入支撑结构层钢带间隙而导致的减薄，在设计寿命内所有载荷组合作用下的最大允许减薄量应小于壁厚最小设计值的 30%。					
		应变	对于每种聚合物材料，允许的弯曲应变应由制造方规定。对于聚乙烯（PE）和聚酰胺（PA）材料，基于名义尺寸的最大允许弯曲应变应为 7.7%；对于聚偏二氟乙烯（PVDF），基于名义尺寸的最大允许弯曲应变为 7.0%。					
抗压铠装层	互锁结构破坏	应力	0.67	0.85	0.85	0.67	0.91 <sup>⑤</sup>	0.85
	压溃 <sup>②</sup>	载荷	0.85					
抗拉铠装层	断裂	应力	0.67	0.85	0.85	0.67	0.91 <sup>⑤</sup>	0.85
	屈曲	载荷	0.85					
	钢丝错位	位移	每个抗拉铠装层与其相邻层之间的累积径向间隙应不超过钢丝厚度的一半。					
抗压溃层 <sup>④</sup>	破裂	应变	对于每种聚合物材料，允许的弯曲应变应值应当由制造方规定，并应有文件证明在此应变时材料满足设计要求。					
防屈曲层	抗拉铠装层的鸟笼效应	应力或应变	0.67	0.67	0.85	0.85	0.85	0.85
外护套包覆层	破裂	应变	对于每种聚合物材料，允许的弯曲应变应值应当由制造方规定，并应有文件证明在此应变时材料满足设计要求。聚乙烯（PE）和聚酰胺（PA）的最大允许弯曲应变应为 7.7%。					

注：① 抗压溃能力的计算应考虑在制造、试验、安装、操作过程中所有因素引起的椭圆度。最大允许的椭圆度（在加载和卸载两种工况）应由制造方给出。可参考 API 17B 的相关要求。

② 对于粗糙管，如骨架层或抗压铠装层中某一层材料利用率不超过许用值，另一层的应力则可以达到材料的屈服强度。

③ 减薄包括因弹性、塑性和蠕变引起的厚度减少。

④ 对于输送含气介质的光滑管，业主和制造方应就抗压溃层的设计、制造和工厂接受试验要求达成一致。

⑤ 对于应力分析，应考虑工厂接受试验、海上测漏试验和结构完整性试验中的最大压力。

2.6.1.2 内压密封层利用率的计算应基于最大允许蠕变和最大许用应变。外包覆层利用率的计算应基于最大许用弯曲应变，满足本章第 8 节的要求。

2.6.1.3 如适用,制造方应评估内压密封层与相临牺牲层之间气体压力积聚相关的压溃失效模式,通过分析确认满足所有设计要求。制造方应确定过大卸压速率的相关操作限制,以防止压溃失效。

2.6.1.4 制造方应评估骨架层、抗压铠装层及抗拉铠装层的屈曲失效模式,并以通过试验验证的分析方法确认各层满足设计要求。骨架层的静水压溃计算可以考虑抗压铠装层的支撑作用。骨架层的屈曲载荷利用率应按照内外压差除以静水压溃抗力来计算。静水压溃抗力是基于经过验证的设计方法算得的最小值,该设计方法应以文件记录,计算中应考虑所有引起椭圆度的工况(如制造、测试、安装和操作工况等)和作用在管上的轴向和径向载荷。

2.6.1.5 抗压铠装层和抗拉铠装层的利用率应按照如下方式进行计算:

- (1) 应力利用率:应力除以结构承载力,其中,应力为该实际结构层计算的平均应力;
- (2) 载荷利用率:施加载荷除以结构达到屈服或失稳时的载荷。

2.6.1.6 应采用经验证的设计方法计算应力,满足本章第 8 节的要求。平均应力应基于总的该层载荷均匀分布于该层所有钢丝上进行计算。结构承载力应选择屈服强度或 0.9 倍的抗拉强度,且不超过 0.9 倍的抗拉强度。用于设计的结构承载能力应选取规定的最小值,也可选取超过了该规定值但经过供应方证明了的最小值。

2.6.1.7 挠性管的最小弯曲半径包括储存最小弯曲半径和操作最小弯曲半径。挠性管的制造过程中的盘卷、储存、FAT 等,应符合储存最小弯曲半径的要求。挠性管的操作工况、安装工况等,应符合操作最小弯曲半径的要求。

2.6.1.8 挠性管的锁死半径(LR)是互锁层发生锁死时的弯曲半径。储存最小弯曲半径(SR)应至少为锁死半径(LR)的 1.1 倍,且不应导致其他层的损坏或错位。

2.6.1.9 挠性管的操作最小弯曲半径应满足以下要求:

- (1) 在所有工况和载荷类型下均应不小于储存最小弯曲半径(SR);
- (2) 表 2.6.1.9 中给出的各工况和载荷类型下相对于锁死半径的比例要求;
- (3) 最小弯曲半径也应满足表 2.6.1.1 中各项准则要求。因此,最小弯曲半径有可能大于表 2.6.1.9 中规定的值。

最小弯曲半径设计准则

表 2.6.1.9

载荷类型	工况		
	操作		非操作
	永久	异常	临时
所有类型	SR		
静态工况下	1.1×LR		
动态支持 <sup>①</sup>	1.1×1.1×LR	1.1×LR	
准动态 <sup>②</sup>	1.25×1.1×LR	1.1×1.1×LR	

注: ① 动态支持:如挠性管在喇叭口处;

② 准动态载荷包含以下应用:

- a、无直接波浪载荷作用在挠性管上;
- b、主导位移是可控的。

2.6.1.10 制造方应证明在考虑各结构层截面在规定服役寿命结束时因磨损、腐蚀和冲刷而导致的预期性能和尺寸降低的情况下,挠性管设计满足表 2.6.1.1 的设计准则和其他所有功能要求。

2.6.1.11 基于可靠性的设计可作为替代设计方法。

## 2.6.2 端部配件设计准则

2.6.2.1 端部配件设计中的许用系数见表 2.6.2.1。

端部配件许用的利用系数

表 2.6.2.1

组件	失效	设计	操作工况	非操作工况
----	----	----	------	-------

	模式	准则	永久		非正常	临时		
			正常	极端		正常		极端
						安装	测试	
承压部件	爆破	应力	0.67	0.85	0.85	0.67	0.91	0.85
抗拉铠装层	断裂	应力	0.67	0.85	0.85	0.67	0.91	0.85
抗拉层锚固系统	拔出； 破断； 填充物失效引起的拔出	载荷	0.67	0.85	0.85	0.67	0.91	0.85

注：设计中应考虑装配导致的钢材抗力变化，如加热/焊接导致的微观结构变化、微观裂纹或其他缺陷。

## 第7节 材料选择

### 2.7.1 管体非金属材料

2.7.1.1 聚合物材料的选择，应考虑允许的温度范围、流体兼容性、抗老化性、抗起泡性等方面，满足本指南第3章中对管体非金属材料的相关要求。

2.7.1.2 典型的聚合物材料如表2.7.1.2所示，材料性能可参考API 17B(2014)中第6.2.2.2节和表14的内容。制造方宜对材料性能采用符合本指南第3章要求的试验进行验证。

非粘结挠性管的典型聚合物材料

表 2.7.1.2

聚合物层	材料类型 <sup>①②</sup>
内压密封层	HDPE、XLPE、PA、PVDF
中间包覆层（抗压溃层）	HDPE、XLPE、PA、PVDF、TPE
外包覆层	HDPE、PA、TPE
保温层 <sup>③</sup>	PP、PVC、PU
耐磨层	PA、PVDF、HDPE

注：① MDPE可用于代替HDPE；

② PA-11、PA-12和PVDF的定义详见DIN 73378、ISO 1874-1、ISO 12086-1和ISO 10931-1；

③ 保温层可以是实体材料、泡沫或合成泡沫。

2.7.1.3 内压密封层的材料选择，应满足与生产流体、注入流体、化学试剂的流体兼容性，并考虑温度、暴露时间、浓度以及应力状态的影响。材料应适用于应用的最低和最高温度范围。材料的抗老化性应满足应用温度范围内的寿命要求。如果输送流体中含有气体，从最大操作压力和温度条件下迅速减压时材料应不会发生起泡。

2.7.1.4 外包覆层的材料选择，应满足与所有渗透流体、附属部件和所有外部条件（空气、海水等）的流体兼容性，应用温度范围的抗老化，抗紫外线的要求。材料应适用于应用的最低和最高温度范围。

2.7.1.5 中间包覆层的材料选择，应适用于应用的最低和最高温度范围，材料应满足与所有渗透流体、外部进入的海水的流体兼容性、在应用温度范围内的抗老化性。

2.7.1.6 保温层的材料选择,应考虑适当的导热系数,以及所应用的最高温度、抗老化性、与渗透流体和外部进入海水的流体兼容性。

### 2.7.2 管体金属材料

2.7.2.1 管体金属材料的选择,应根据管道内外部应用环境和制造限制条件,考虑材料可加工性、可焊性、强度、耐冲蚀性、耐腐蚀性、硫化物应力开裂、氢致开裂、抗氢脆能力等方面,满足本指南第 3 章中对管体金属材料的相关要求。

2.7.2.2 当多种不同材料组合使用时,应考虑可能发生的不利影响。

2.7.2.3 骨架层的推荐材料包括碳钢、铁素体不锈钢(AISI 409 和 AISI 430)、奥氏体不锈钢(AISI 304、AISI 304L、AISI 316 和 AISI 316L)、高合金不锈钢(Duplex UNS S31803)、镍基合金(如 N08825)。其中,碳钢适用于非腐蚀环境,镍基合金适用于腐蚀环境最严重的环境。

2.7.2.4 骨架层材料选择时,应考虑输送介质成分和安装过程中管内临时进入海水的情况。输送介质主要考虑的参数包括流体温度、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、氯离子浓度和氧含量,其他参数包括 pH 值、含水率、游离硫和汞含量宜予以考虑。用于酸性介质环境的骨架层,宜参考 NACE MR0175 要求选用抗 HIC 和 SSC 的材料。当介质中氯离子含量较高时,宜进行抗 SCC 试验。

2.7.2.5 抗压/抗拉铠装层,通常根据设计要求选取碳含量适当的碳素钢。在环境条件允许的情况下,设计要求强度较高时,可选择高碳钢。低碳钢和中碳钢可用于酸性服役条件,同时应满足 NACE MR0175 的抗硫化氢标准。对于酸性环境,材料可能需要进行热处理,例如调质。

### 2.7.3 端部配件材料

2.7.3.1 端部配件及涂层的材料选择,应基于内外部的环境条件,并满足本指南第 3 章中对端部配件材料的相关要求。

2.7.3.2 端部配件主要金属部件的材料通常是合金结构钢 AISI 4130 或合金不锈钢。

2.7.3.3 端部配件的防腐涂层材料,通常采用化学镀镍、625 合金、环氧树脂涂层系统或氟聚合物涂料。

2.7.3.4 用于固定抗拉铠装层的端部配件内的环氧树脂,其玻璃化转变温度应在最大设计温度以上,根据设计要求选择压缩和剪切强度适宜的环氧树脂,并考虑材料的兼容性和老化。

## 第 8 节 结构设计

### 2.8.1 内压密封层

2.8.1.1 内压密封层分析应考虑操作工况、安装工况和试验工况下最不利载荷组合的影响,校核应变和减薄(包括弹性、塑性和蠕变),以确定合适的壁厚。分析应至少考虑以下因素:

- (1) 最小弯曲半径;
- (2) 内压和环空的压力;
- (3) 温度;
- (4) 整管的轴向伸缩、扭转和径向膨胀;
- (5) 聚合物材料性能退化,如老化、松弛、收缩、塑化剂损失、介质流体的扩散和聚合物基体对介质流体的吸收(溶胀);
- (6) 蠕变;
- (7) 公差。

2.8.1.2 内压密封层壁厚的计算方法应经过试验或经验的验证。

2.8.1.3 内压密封层在操作压力和操作温度范围内的蠕变量,应基于相邻抗压/抗拉铠装层中钢带/丝间的间隙和受载情况进行确定,也可以采用保守的分析方法。

2.8.1.4 壁厚计算中采用的抗压铠装层或抗拉铠装层（如适用）的钢丝间隙，应为整管弯曲到操作最小弯曲半径（FAT的水压试验时一般大于或等于储存最小弯曲半径）时对应的钢丝最大间隙，并考虑制造公差。

2.8.1.5 内压密封层分析时应考虑内压密封层与相邻层（骨架层和铠装层）之间的接触压力，以及在抗压/抗拉铠装层的钢带/丝间的间隙等处因厚度变化产生的应力集中。

2.8.1.6 内压密封层的厚度应满足操作工况、安装工况时在端部配件处的固定和密封要求。如内压密封层的相邻层没有在端部配件处进行固定，也应考虑这些层的重量对内压密封层的影响。

2.8.1.7 制造方应验证内压密封层材料不会由于缺口敏感性和应力集中而产生初始裂纹。对于因制造过程可能导致的内压密封层的应力增加和缺陷，以及端部配件处的加工痕迹，宜予以特别注意。对于用裂纹敏感材料（如PVDF）制造的内压密封层，其厚度应保证初始裂纹在典型操作工况中热循环情况下，不会受热循环影响沿厚度方向扩展。对于此类材料，制造方应文件证明该层的厚度是足够的。

2.8.1.8 对于没有抗压溃层的光滑管，在设计中应考虑该内压密封层的抗压溃能力。

2.8.1.9 如内压密封层是由多层结构组成，不能采用不同的材料，除非有试验记录证明这些材料能够满足使用寿命内和服役条件下的设计要求。设计中应包括防止相邻层间的不可接受气体聚积的方法。

## 2.8.2 外包覆层

2.8.2.1 外包覆层的设计应考虑以下因素的影响：

- (1) 因老化和流体介质吸收/扩散到聚合物基体而引起的材料性能变化；
- (2) 缺口、尖角等制造缺陷；
- (3) 由于弯曲、轴向伸缩、扭转、外压和环空压力产生的在操作温度范围内的蠕变和应变；
- (4) 材料蠕变至外层抗拉铠装层的钢丝间隙中；
- (5) 安装载荷；
- (6) 磨损；
- (7) 附属部件导致的局部载荷；
- (8) 与相邻部件接触导致的温度作用，如摩擦发热，由光纤、电缆和液压管组成的复合挠性管以及脐带结构；
- (9) 由于附属构件、自埋或预埋、海生物产生的保温影响。

## 2.8.3 中间包覆层

2.8.3.1 如中间包覆层是设计用于防止环空中的流体向外泄漏或者防止外部海水流入环空，则中间包覆层的设计应满足表 2.6.1.1 中对于抗压溃层的要求。

2.8.3.2 对用于输气或气液混合的光滑管，业主和制造方应就抗压溃层的设计要求达成一致。

2.8.3.3 对用于隔热作用的中间包覆层开孔时，开孔的大小和间隔应考虑到对抗拉铠装层的保护。

2.8.3.4 如中间包覆层设计用于防止内部流体泄漏，也应考虑蠕变、老化、松弛、收缩、塑化剂损失、介质流体的扩散和聚合物基体对介质流体的吸收（溶胀）等因素。

## 2.8.4 内骨架层

2.8.4.1 内骨架层的抗压溃设计，应考虑：

- (1) 最小规定内压，一般设计中为真空；
- (2) 作用于内压密封层上的最大外压，考虑静水压力、环空压力（包含环空进水情况）、聚合物层之间的压力积聚（对于多层结构的挠性管）以及外层的接触压力；
- (3) 管道最大椭圆度，包括管道安装方法引起的残余椭圆度；
- (4) 管道弯曲至最小操作弯曲半径。

2.8.4.2 骨架层设计应考虑内压密封层的热膨胀、接触、塑化剂流失、压力载荷和/或溶胀影响。

2.8.4.3 对于骨架层的冲蚀和腐蚀，制造方应基于使用寿命内的特定介质成分和流速，评估骨架层的冲蚀/腐蚀速率，并应以文件证明骨架层不会因此发生失效。

### 2.8.5 抗压铠装层

2.8.5.1 抗压铠装层设计应满足环向强度的要求。抗压铠装层的设计应考虑：

- (1) 铠装层钢丝之间的间隙控制；
- (2) 防止互锁失效；
- (3) 制造过程中的塑性变形；
- (4) 制造过程和 FAT 试验引起的残余应力。

### 2.8.6 抗拉铠装层

2.8.6.1 抗拉铠装层设计应满足轴向强度的要求。抗拉铠装层的设计应考虑：

- (1) 扭转性能要求；
- (2) 铠装层钢丝之间的间隙控制；
- (3) 环向强度，特别是对于没有抗压铠装层的挠性管；
- (4) 制造过程中的塑性变形。

2.8.6.2 抗拉铠装层钢丝的设计（即钢丝几何尺寸、缠绕角度和钢丝数量）应满足轴向稳定性（如埋设管道）、钢丝侧向屈曲和避免鸟笼效应的要求。

2.8.6.3 整管的扭矩平衡和轴向抗压强度应满足功能要求。

### 2.8.7 保温层

2.8.7.1 保温层的设计应满足本指南 2.10.3 节的要求。

### 2.8.8 防屈曲层

2.8.8.1 制造方应依据项目具体要求确定是否需要设置防屈曲层；

2.8.8.2 防屈曲层的许用应力或应变应满足表 2.6.1.1 中的要求。

2.8.8.3 挠性管在轴向压缩载荷下（无弯曲载荷），两层抗拉铠装层之间或抗拉铠装层与相邻层之间的径向累计间隙不能超过抗拉铠装层扁钢厚度的一半。

### 2.8.9 端部配件

2.8.9.1 端部配件应设计为挠性管各层的可靠终端，在考虑所有相关因素包括腐蚀、收缩、蠕变、老化和压力效应的情况下，在使用寿命内不发生泄漏、结构变形、抗拉铠装层钢丝、内骨架层和挤塑层的拔出。

2.8.9.2 端部配件设计应满足使用条件下的热循环和压力循环的要求，考虑 2.8.1 节至 2.8.8 节中的全部影响。

2.8.9.3 端部配件的设计方法应以文件说明，并经过有文件记录的试验和分析的验证。

2.8.9.4 端部配件设计应考虑制造公差的影响。

2.8.9.5 端部配件设计应考虑任何与端部配件相连的附属部件所提供的支撑载荷，如弯曲加强器。

2.8.9.6 端部配件设计应考虑临时或永久的悬挂载荷，如 J 形管/I 形管悬挂，或垂直铺设作业时的悬挂。

2.8.9.7 端部配件设计应保证内压密封层、外包覆层和中间包覆层（适用时，如保温管道和光滑管）的密封性。

2.8.9.8 端部配件处密封机构的设计应确保由于使用寿命期内的脱出力和密封圈的安装而产生的组合应变不会导致内压密封层、外包覆层在使用寿命内发生失效。

2.8.9.9 端部配件的设计和分析应证明外包覆层和端部配件外套之间的密封处总存在净的密封压力。该分析应考虑外部压力、水深、温度和外包覆层材料的长期蠕变/松弛的影响。

内压密封层在端部配件处的终端设计应依据 API 17TR1 进行。

2.8.9.10 端部配件腔体内径与挠性管内径的任何差异应以文件形式提交给业主，用于清管器的尺寸设计。

2.8.8.11 在端部配件设计中，骨架层相对于端部配件的轴向运动应予以机械限制。

2.8.9.12 端部配件中的承压部分、抗拉部件以及端部配件锚固系统，应在考虑所有实际上可能的载荷组合情况下满足设计要求，详见表 2.6.2.1。

2.8.9.13 如堆焊层的强度等同或高于母材的强度且焊接工艺经过验证，在端部配件的分析中可以将堆焊层的厚度包含在端部配件的壁厚中。

2.8.9.14 制造方应分别计算管体结构和端部配件的爆破压力。计算应基于可保证的材料最低性能。制造方应说明端部配件的爆破压力计算值是否低于管体结构的爆破压力计算值。

2.8.9.15 制造方对于端部配件锚固系统承载能力的确定方法应是经过验证的。

2.8.9.16 制造方应分别计算管体结构的抗拉能力和端部配件锚固系统的抗拉能力。制造方应说明端部配件锚固系统的抗拉能力是否低于管体结构的抗拉能力。

2.8.9.17 如端部配件处装配了弯曲加强器，抗拉铠装层的应力计算应考虑弯曲加强器对从管体到端部配件内部固定处的过渡效应。

2.8.9.18 设计中应考虑端部配件内部使用或装配时为便于操作而临时使用的任何装置的影响。

## 第 9 节 使用寿命分析

### 2.9.1 一般要求

2.9.1.1 静态挠性管的使用寿命分析应说明挠性管在使用寿命内的材料性能，并符合本指南第 3 章的要求。在设计计算中，金属材料应采用使用寿命内的最低材料强度。聚合物材料应证明能在使用寿命内满足本章第 8 节要求。

2.9.1.2 使用寿命分析应考虑以下相关内容：

(1) 聚合物在操作环境下的老化、蠕变、尺寸变化（收缩、膨胀）以及应变导致的失效；

(2) 金属的腐蚀、冲蚀和磨损。

### 2.9.2 环空中的钢材腐蚀

2.9.2.1 对于环空破损后进入海水（不含空气）的工况，环空内钢材的腐蚀评估应考虑钢材与适当盐度的海水和适当浸入速率的腐蚀性气体保持永久接触。

2.9.2.2 对于环空完整工况，环空内钢材的腐蚀评估应考虑包括关停和重启在内的所有操作温度历程中环空内渗入的凝结液体。设计方法应能预测环空中含有凝结液体的时间，否则设计应假定整个使用寿命内均处于含有凝结液体的状态。

### 2.9.3 老化

2.9.3.1 应对内压密封层、包覆层进行使用寿命评估，考虑设计操作条件（如温度、pH 值、含水率、甲醇、乙二醇和其他已知暴露的成分）对各层长期退化的影响。基于已知的老化机理，应说明这些层的老化和退化适用于所有应用条件。

2.9.3.2 应对聚合物层老化前后的最大和最小保温绝热进行校核，并考虑包括海生物、埋设、弯曲加强器和其他附件的影响。

## 第 10 节 系统设计

### 2.10.1 一般要求

2.10.1.1 挠性管的系统设计应考虑以下方面的适用要求：

- (1) 防腐;
- (2) 保温绝热;
- (3) 排气;
- (4) 清管和过出油管;
- (5) 耐火性;
- (6) 背负式管道;
- (7) 连接器;
- (8) 检验和在线监测;
- (9) 安装;
- (10) 回收;
- (11) 放热化学反应清管;
- (12) 冲蚀;
- (13) 磨损;
- (14) 运输、储存和装卸;
- (15) 管道附件;
- (16) 导向和支撑结构;
- (17) 防护要求。

2.10.1.2 用于海底管道的挠性管, 还应考虑以下系统设计的适用要求:

- (1) 管道路由;
- (2) 坐底稳定性;
- (3) 隆起屈曲;
- (4) 交叉跨越。

2.10.1.3 应验证挠性管外包覆层和相邻层之间的摩擦系数满足安装/回收用张紧器拉力和卡箍装置的要求, 考虑环空完整工况和环空破损进入海水工况。

## 2.10.2 防腐

2.10.2.1 挠性管应考虑以下方面业主规定的防腐功能要求:

- (1) 端部配件的内外防腐;
- (2) 管体的阴极保护系统;
- (3) 保护电压、电源和电流密度;
- (4) 在储存(陆上或水下储存)和安装时的保护, 如适用;
- (5) 防腐系统与其他相邻防腐系统之间的兼容性。

### 2.10.2.2 电化学腐蚀

如不同材料的电化学腐蚀会增加使用系数超过允许限度, 材料选择时应考虑电化学腐蚀的效应。如可能发生电化学腐蚀, 不同的金属之间应以绝缘物或涂层进行隔离, 或设计有足够的腐蚀裕量。

### 2.10.2.3 表面处理

除非有文件证明材料在特定环境下是抗腐蚀的, 所有外部的钢材表面应依据国际公认或由业主指定的标准进行防腐处理或涂层保护, 以对挠性管的功能要求中所规定的所有环境条件进行防腐。

### 2.10.2.4 腐蚀裕量

应依据挠性管的服役位置、安装条件和功能要求, 评估对内外腐蚀裕量的要求。制造方应对该评估及其对挠性管部件的影响予以文件说明。

端部配件的接口处的腐蚀应不引起任何密封和锁紧机构的损坏。

采用抗腐蚀涂层或抗腐蚀合金的方法可优先于腐蚀裕量方法。制造方应有文件证明抗腐蚀涂层或抗腐蚀合金在特定应用条件和环境中的适用性。

### 2.10.2.5 阴极保护

阴极保护系统的设计应符合业主规定的功能要求。如阴极保护系统是用于保护抗拉铠装层, 电连通连接在端部配件上的牺牲阳极的尺寸应适当选取, 并保证抗拉铠装层与端部配件之间的电连通性。应确认相邻阳极的电压降可接受。阴极保护系统的设计方法应以文件说明。

阴极保护系统设计时应考虑端部配件涂层和外包覆层的损坏。设计时考虑的涂层、外包

覆层损坏程度以及外包覆层破损后至维修前的持续时间，应得到业主认可。

如挠性管道系统中的某个部件是由邻近结构的阴极保护系统提供腐蚀保护，则制造方应在设计报告中通过计算证明该阴极保护系统能够兼容并保证其在特定环境下的服役寿命。阴极保护设计对于最大和最小电流的情况均应予以校核，当采用高强钢时应特别注意氢致开裂（HIC）。

### 2.10.3 保温绝热

2.10.3.1 挠性管的设计应满足业主对于热损失或保温性能的要求。

2.10.3.2 总传热系数（OHTC）的确定应基于管子的名义内径，并区分管体自身的总传热系数和考虑外部效应的总传热系数，如埋设管道上的覆土层。

2.10.3.3 保温绝热设计，应确保挠性管总传热系数和冷却时间不低于 2.10.3.1 中业主规定的对整个服役期内所要求的水平。确定可接受的冷却时间时，应考虑端部配件的传热系数。

2.10.3.4 保温绝热材料在温度、静水压、环空进海水、材料吸水和蠕变综合影响下的物理性能和力学性能的退化，应由制造方记录并在设计中予以考虑。

2.10.3.5 保温绝热的设计应基于外包覆层破损导致保温层暴露于空气或海水中的假定。当挠性管的环空中设有密封的中间包覆层时，保温绝热设计应基于最内部的环空是稳态完整的假定。可以采用设置隔层或附加的包覆层来限制外包覆层破坏后挠性管进水的区域。设计方法应以文件记录，包括外包覆层破坏的假定。设计中应计算端帽对于密封保温的影响。

2.10.3.6 应对储存、运输、装卸、安装和运行期间的各种条件进行分析。如需要，采用模拟试验说明其性能。制造方应验证并文件说明，保温层因受张紧器、立式盘、托管架、滚轴支架、自重和冲击载荷作用发生挤压而导致的永久变形，引起的总传热系数或者冷却时间的改变不会超过规定要求。

### 2.10.4 排气

2.10.4.1 挠性管设置排气系统的目的是避免环空内压力过度积聚。

2.10.4.2 如需要设置排气阀，排气系统的设计应符合业主对以下方面的要求：

- (1) 排气系统的组件；
- (2) 排出气体流速；
- (3) 排气位置的限制条件；
- (4) 接口要求；
- (5) 气体监测系统；
- (6) 如适用，采用水下排气阀；
- (7) 排气系统对连接管道的背压；
- (8) 环空的完整性监测。

2.10.4.3 除 2.10.4.2 中的业主要求之外，排气系统的设计还应满足以下要求：

- (1) 将渗透流体安全地排出；
- (2) 如管道安装在封闭空间内，设计中应避免管道外压力的过度聚集；
- (3) 暴露在渗透流体和海水中的部分应可抗化学作用；
- (4) 应以文件证明排气阀可以在外包覆层破裂前正常打开，外包覆层厚度为公差范围内的最小值；
- (5) 最大排气系统压力不会引起在内腔或环空泄压时的内压密封层的压溃或起泡；
- (6) 爆破环仅作为备用排气系统；
- (7) 排气阀作为排气系统的一部分应用于海底管道时，应保证在最大静水压力下海水不会进入；
- (8) 对于海底平管段每个端部配件应至少设置 2 个排气孔；
- (9) 如采用排气阀，每个端部配件至少设置 2 个；
- (10) 排气阀设计应满足特定的海生物环境；

气体排放应通过端部配件处实现，除 2.10.4.2 中有特殊说明的情况外。挠性管各层的设计应能满足渗透气体的泄放要求。

### 2.10.5 清管和过出油管

2.10.5.1 挠性管的设计应能够满足清管、过出油管（如适用）、修井（如适用）和其他作业的管内工具的要求，包括内径、弯曲半径、端部配件的过渡等方面。挠性管尺寸公差（包括椭圆度）的选择应考虑这些相关要求。用于过出油管的挠性管应符合 API 17C 的相关要求。

2.10.5.2 挠性管最内层（骨架层或内压密封层）的选择，应与管内工具的要求相兼容，且制造方应通过试验证明其兼容性并有相应文件记录。

2.10.5.3 端部配件与挠性管最内层之间的设计宜是光滑过渡。因腐蚀引起的厚度变化不应影响清管作业。端部配件的设计应确保因腐蚀导致的厚度变化不会引起清管操作对骨架层和内压密封层造成损坏。

### 2.10.6 耐火性

2.10.6.1 如挠性管有耐火性要求，则应依据公认的标准进行耐火测试，或提供先前已经设计的试验文档予以证明。在外包覆层外面可以额外增设绝缘阻火层。此时，对于管体和端部配件的连接处，宜予以特别考虑。

### 2.10.7 坐底稳定性

2.10.7.1 坐底稳定性分析可以参考海底管道公认的推荐作法。

### 2.10.8 路由及交叉跨越

2.10.8.1 如挠性管跨越其他挠性管、钢管或脐带缆，宜采取适当保护措施，除非可以证明最小弯曲半径和其他设计准则均满足要求。

2.10.8.2 如输气和输液管道交叉跨越，一般输气管道布置在上，输液管道布置在下。

2.10.8.3 当交叉跨越的挠性管易受运动影响时，交叉跨越的保护措施宜对该运动予以考虑。对于多条管道交叉接触或频繁移动而发生接触情况，宜设置金属或聚合物材质的磨损套筒。

### 2.10.9 隆起屈曲

2.10.9.1 对于挖沟、埋设或抛石的挠性管，宜对因压力和温度引起隆起屈曲、隆起蠕变和终端承载力进行校核。

2.10.9.2 隆起屈曲的设计准则宜基于以下方面：

- (1) 管道弯曲半径不低于最小许用弯曲半径；
- (2) 管道不脱离其沟槽边界；
- (3) 沟槽和回填对管道的约束不会导致管道应力或载荷超过结构设计准则；
- (4) 隆起过程不应导致管道发生任何会引起泄漏的失效模式，如隆起使管道暴露被拖网钩挂；
- (5) 对于跳跃屈曲有足够的裕量。

### 2.10.10 管道防护

2.10.10.1 对于渔具、锚、系泊链等外物引起损伤的情况，宜考虑采用适当的保护措施，并满足业主和制造方一致认可的要求。

2.10.10.2 对于承压部分（如管体、端部配件、连接器），在正常操作工况下宜满足：撞击载荷不使管道产生永久缺陷变形。

2.10.10.3 根据采用的保护措施，宜通过计算分析证明管体、端部配件、连接器的使用系数满足本指南的相关要求。

### 2.10.11 安装

2.10.11.1 挠性管的安装和回收，应考虑载荷限制、作业的季节和环境、夹紧装置/张紧器的载荷、船舶运动、安装方式、安装公差、不同船舶之间的倒驳、空管/充水的安装和回收、安装和回收操作的可预见次数等因素影响。

2.10.11.2 挠性管应满足业主对其在使用寿命内的可回收和再利用的要求。

2.10.11.3 挠性管安装前应进行安装分析，并考虑应急预案。动态安装分析应限定最大的海况，保证在特定船上进行适宜的常规甲板活动和安装作业。用于安装分析的载荷应选取安装过程中可能出现的最恶劣工况。

2.10.11.4 如使用张紧器，应保证在安装情况下张紧器的最大和最小张拉力不会使管道超出设计要求。在管道最大载荷（即管道悬挂工况下的张力）下，应校核管道是否会挤压压溃。张紧器的最小负载应大于防止管道滑落所需的力，该力为外包覆层与张紧器之间的摩擦力和外包覆层与相邻铠装层之间的摩擦力的较小值。

#### 2.10.12 背负式管道

2.10.12.1 如挠性管设计用于背负式管道，则挠性管应满足业主规定的相关要求。

2.10.12.2 如挠性管作为钢管或其他结构上的子管，则宜对挠性管和钢管的划伤和从钢管向挠性管的潜在高温传递予以充分防护。

2.10.12.3 如脐带缆或更小直径管道作为挠性管的子管，在背负式管道系统的设计时宜对以下方面予以考虑：

- (1) 水动力相互作用；
- (2) 两者之间的相对运动；
- (3) 两者在长度方面的变化，特别是由于挠性管和钢管不同的压力、热膨胀系数和轴向刚度所引起；
- (4) 管卡的载荷；
- (5) 挠性管的载荷和磨损；
- (6) 挠性管和管卡的材料蠕变和性能长期退化；
- (7) 内压、轴向拉力、外压、弯矩、扭转所引起的管道截面形状的改变。

## 第3章 材料检验

### 第1节 材料性能要求

#### 3.1.1 一般要求

3.1.1.1 本章适用于聚合物材料（包括添加剂），扁钢、圆钢或者成型钢材，成品或半成品的端部配件部件的材料要求。但不包括用于骨架层、抗压铠装层、抗拉铠装层的复合材料。

3.1.1.2 制造方应提供试验记录文件，证明材料在使用寿命内的安装和操作工况下均能满足业主规定的功能要求。试验文件应与本指南第3章第2节的要求一致。如缺少适当的评定记录，制造方应根据本指南第3章第2节进行试验。

3.1.1.3 所有的材料（包括润滑剂）和其他用于挠性管制造的辅助材料，均需有书面文件证明其在设计温度条件下与海水和渗出的气体/液体兼容。材料分解产生的副产物应不会损坏管的功能层（如内压密封层）。制造方须以书面文件证明在挠性管制造中采用的所有润滑剂和防腐涂层与挠性管中所有其他结构材料或压力密封材料具有兼容性。

3.1.1.4 制造方应针对表 3.1.2.1、表 3.1.3.1 和表 3.1.5.1 中列出的材料性能，制定试验程序文件。

#### 3.1.2 管体聚合物材料

3.1.2.1 表 3.1.2.1 给出了挠性管设计、分析所需的内压密封层、中间包覆层、外包覆层和保温层的聚合物材料性能。

聚合物材料性能要求

表 3.1.2.1

性能	参数 <sup>①</sup>	内压密封层	中间包覆层	外包覆层	保温层 <sup>②</sup>
力学/物理性能	抗蠕变	× <sup>③</sup>	×	×	×
	拉伸性能	×	×	×	M
	应力松弛	C	C	C	-
	弹性模量	×	×	×	-
	压缩性能	×	×	×	×
	耐静液压	-	-	-	×
	耐磨	-	-	C	-
	密度	×	×	×	×
热性能	缺口冲击	C	-	C	-
	导热系数	×	×	×	×
	热膨胀系数	×	×	×	-
	热容	×	×	×	×
渗透特性	脆化/玻璃化转变温度	C	C	C	-
	流体渗透	×	×	×	-
兼容和老化	抗起泡	×	-	-	-
	流体兼容	×	×	×	×
	老化	×	×	×	×
	环境应力开裂	C	C	C	-
	耐紫外光老化	-	-	×	-
	吸水	-	-	-	×

注：① 试验程序参考表 3.2.1.1 (a)。

② 对保温层的性能要求适用于材质为聚合物和非聚合物的保温材料。

③ × (设计要求), C (可用于比较, 不直接用于设计), M (不作设计要求, 仅用于制造分析)。

3.1.2.2 制造方应按表 3.1.2.1 中的要求, 确定各聚合物层所选材料在规定的温度和压力范围内 (包含设计值) 的材料性能。

3.1.2.3 制造方应具有经验证的预测聚合物在使用寿命内材料性能的方法, 并有试验记录和分析说明该方法可给出保守的预测结果。

3.1.2.4 聚合物材料的老化和溶胀对于气体渗透性的影响, 应予以分析。

3.1.2.5 对于输送介质中含有气体的情况, 应通过材料试验验证挠性管从最大操作压力和温度条件下迅速减压时, 内压密封层的聚合物不会发生起泡或退化 (如裂纹)。

3.1.2.6 对于内压密封层, 制造方应依据符合本指南要求的试验结果, 来确定评价聚合物合于使用的准则 (包括脆化、蠕变、收缩、溶胀、塑性变形, 以及其他可能会影响内压密封层功能的退化模式和机理)。

3.1.2.7 制造方应确定, 挠性管在设计/操作的温度和压力下, 保温层处于干燥和海水浸没环境中的导热系数。

3.1.2.8 制造方应以试验验证保温材料的抗压强度足够承受在设计要求中所有可能出现的压缩载荷。保温层处于海水浸没环境中也应满足本要求。

### 3.1.3 管体金属材料要求

#### 3.1.3.1 一般要求

如适用, 制造方应对所选材料及焊件在特定环境中的适用性按照表 3.1.3.1 进行试验验证。材料的选取应考虑挠性管服役期间结构层暴露在外界环境中对其造成的腐蚀影响。应用于酸性介质环境条件下的材料应依照 API 17J (2014) 中 6.2.4.2 进行试验。所有设计处于阴极保护下或可能暴露于阴极保护作用下的金属部件, 应使用在该环境下可以抵抗氢脆的材料制造。

金属材料 and 焊件的性能要求

表 3.1.3.1

性能/特性	参数 <sup>①</sup>	骨架层	抗压铠装层	抗拉铠装层
合金性能	化学成分	× <sup>②</sup>	×	×
	微观结构	C	C	C
力学性能 <sup>④</sup>	屈服强度/抗拉强度	×	×	×
	伸长率	C	C	C
	硬度	C	C	C
	抗冲蚀	×	-	-
材料特性 <sup>④</sup>	抗硫化物应力开裂 (SSC) 和氢致开裂 (HIC)	×	×	×
	耐蚀性 (流体、化学药剂)	× <sup>③</sup>	×	×
	阴极保护条件下的抗开裂性能	-	-	×

注: ① 试验程序参考表 3.2.1.1 (b)。

② × (设计要求), C (可用于比较, 不直接用于设计), M (制造分析)。

③ 腐蚀试验中检查 SSC 和 HIC 性能。

④ 用于测试金属材料性能的试样应从生产管上取样, 且试样的塑性应变和残余应力水平应具有代表性。

#### 3.1.3.2 骨架层

若清管器、过出油管器和油井维修设备等需要从挠性管内通过, 则应通过计算或试验确定预计发生的磨损速率。磨损速率较高的管线内壁应额外增加磨损裕量, 增加量通过分析磨损速率数据和预期发生概率来确定。

#### 3.1.3.3 抗压/拉铠装层

对于特定应用环境, 制造方应该确定抗压和抗拉铠装层所选用的碳钢材料对腐蚀 (均匀

腐蚀和点腐蚀)和裂纹(SSC、HIC)的敏感性。

### 3.1.4 端部配件材料要求

#### 3.1.4.1 金属材料

端部配件主要承压金属部件应根据 ASTM A668、ASTM A29 或 ASTM A182 的要求进行锻造或加工。酸性介质环境条件下应用的金属材料应满足 NACE MR0175 的要求。

制造方应书面记录所有端部配件主要金属部件的化学成分、制造方法、热处理工艺以及拉伸、硬度和夏比冲击性能。材料的化学成分应确保部件在经过所有加工工序(包括焊接和焊接后热处理)后的性能满足服役要求。

应通过材料选择,或涂层与阴极保护相结合的方式,确保端部配件与排气阀在特定应用环境中的耐腐蚀性。端部配件内壁材料应可以抵抗含有固体颗粒的流体所引起的冲蚀。所有设计处于阴极保护下或可能暴露于阴极保护作用下的金属部件,应使用该环境下可以抵抗氢脆的材料制造。

所有与输送介质直接接触的表面材料,应通过试验证明其耐腐蚀性。包覆层密封圈和法兰密封表面,应通过选材和涂层保证其耐腐蚀性能。

#### 3.1.4.2 环氧树脂材料

嵌入抗拉铠装层的环氧树脂填充材料,应有书面文件证明其在制造过程和使用寿命内能承受相应的温度。应考虑端部配件在封闭空间内可能承受的最高温度。

制造方应证明环氧树脂在温度为 20°C 和 25°C 之间以及最小和最大设计温度之间的抗压强度。应验证环氧树脂的玻璃化转变温度、流体兼容性以及老化性能。试验所用环氧树脂必须按照供应方的相关说明进行混合和固化。

### 3.1.5 防屈曲层材料要求

3.1.5.1 如适用,制造方应对所选材料在特定环境中的适用性按照表 3.1.5.1 进行试验验证。

3.1.5.2 老化试验应在操作温度下进行,并涵盖干燥的完整环空状态和海水(不含气)进入的浸水状态。

防屈曲层性能要求

表 3.1.5.1

性能	参数	防屈曲带
力学/物理性能	抗蠕变	C <sup>①</sup>
	拉伸性能	×
	应力松弛	-
	弹性模量	×
	硬度	-
	压缩性能	-
	耐静液压	-
	冲击强度	-
	耐磨	×
	密度	×
	缺口敏感性	-
热性能	导热系数	C
	热膨胀系数	-
	软化点	-
	热容	C
	脆化/玻璃化转变温度	-
渗透特性	流体渗透	-

	抗起泡	-
兼容和老化	流体兼容	×
	老化	×
	环境应力开裂 <sup>②</sup>	×
	耐紫外光老化	-
	吸水	-

注：① ×（设计要求），C（可用于比较，不直接用于设计），M（制造分析）。

② 适用于材料对于该种失效模式比较敏感的情况。

## 第2节 材料性能试验

### 3.2.1 管体材料试验要求

3.2.1.1 表 3.1.2.1 和表 3.1.3.1 规定的挠性管中所有材料的物理、力学性能、化学性能和其他特性，应由制造方通过文件规定的试验方法进行验证。该方法应能够根据其试验结果和分析程序确认每种材料在特定使用寿命内的适用性。表 3.2.1.1 (a) 和表 3.2.1.1 (b) 中的试验程序用于测定表 3.1.2.1 和表 3.1.3.1 中的材料特性。如本章未指定测试方法，可参考 API 17A，或者可参考 3.2.3.1 的要求使用制造方的方法。进行材料性能评定试验时，应考虑挠性管生产过程中可能削弱设计所要求的各项性能的全部工艺。如果材料评定试验不能在生产工艺管上取样进行，制造方应通过文件证明材料的等效功能。非工艺流程材料的使用应得到本社或业主批准。

聚合物材料和防屈曲层材料的试验程序

表3.2.1.1 (a)

特性	试验项目	试验规程 <sup>①③</sup>		说明 <sup>②</sup>
		ISO <sup>②</sup>	ASTM <sup>②</sup>	
力学/物理性能	抗蠕变	ISO 899-1	ASTM D2990	基于温度和压力
	拉伸性能和弹性模量	ISO 527-1 ISO 527-2 ISO 527-3	ASTM D638 ASTM D882 ASTM D3759 <sup>④</sup>	-
	应力松弛	ISO 3384	ASTM E328	-
	压缩性能	ISO 604	ASTM D695	样品要反应实际几何结构（包覆层/带层）
	抗静液压	-	-	参考API 17L2
	耐磨	ISO 9352	ASTM D4060	或ASTM D1044； 仅用于对比的定性试验， 可参考API 17L1
	密度	ISO 1183	ASTM D792	或 ASTM D1505
	缺口敏感性	ISO 179	ASTM D256	-
热性能	导热系数	ISO 8301	ASTM C518	或ISO 8302/ASTM C518
	热膨胀系数	ISO 11359-2	ASTM E831	-
	热容	ISO 11357-1 ISO 11357-2	ASTM E1269	-
	玻璃化转变温度	ISO 11357-2	ASTM E2602 ASTM E1356 ASTM E1640	可采用DSC或者DMA测试方法
	脆化温度	ISO 974	ASTM D746	-

渗透特性	流体渗透	API 17J (2014) 6.2.3.2	-	至少考虑工况存在的CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、甲醇和水。可参考ISO2556
	抗起泡	API 17J (2014) 6.2.3.3	-	-
兼容性和老化	流体兼容	API 17J (2014) 6.2.3.4	-	-
	老化	API 17J (2014) 6.2.3.5	-	-
	耐紫外光老化	-	-	制造方应规定试验方法, 仅作定性测试
	吸水	-	-	可参考ISO 62/ASTM D570
	环境应力开裂	ISO 22088	ASTM D1693	-

- 注：① 此试验程序适用于表3.1.2.1和表3.1.5.1。  
 ② ASTM等效于相关ISO国际标准。  
 ③ 当没有规定试验方法时，可依据本指南3.2.3中的规定，采用制造方的试验方法。  
 ④ ASTM D3759 用于厚度小于 1mm 的薄膜和带材。

金属材料及其焊件的试验程序

表 3.2.1.1 (b)

试验项目	试验规程	说明
化学成分	ASTM A751/ISO 8457-2	
拉伸性能	ISO 6892	屈服强度/抗拉强度/伸长率
硬度	ISO 6507-1	仅应用于酸性服役中的材料 (仅对铠装层材料)
硫化物应力开裂 (SSC) 和氢致开裂 (HIC) <sup>①②</sup>	API 17J (2014) 中 6.2.4.2	对于规定环境 (如适用, 需对骨架层与铠装层材料进行测试)
抗腐蚀 (流体、化学药剂) <sup>③</sup>	API 17J (2014) 中 6.2.4.3	对于规定环境
抗冲蚀	API 17J (2014) 中 6.2.4.4	仅对骨架层材料
氢脆	API 17J (2014) 中 6.2.4.6	仅对暴露在阴极保护之下的抗拉铠装层材料

- 注：① 在 Cl<sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>S 环境下，对于腐蚀应力敏感的骨架层材料，如双相不锈钢，需考虑 SSC 和 HIC 试验检测。  
 ② 如业主要求，可对腐蚀试验后的骨架层材料试样进行 HIC 检查。  
 ③ 腐蚀试验应使用成型材料。

### 3.2.2 端部配件材料试验要求

#### 3.2.2.1 金属材料

用于端部配件金属材料评定试验使用的试样应符合以下要求。应对端部配件主要部件使用的金属材料按照规定的程序进行以下性能的测试并进行记录。

- (1) 化学成分：ASTM A751；
- (2) 拉伸性能：ISO 6892；
- (3) 夏比冲击：符合 API 17J (2014) 中 6.2.5.1 的要求；
- (4) 硬度：符合 API 17J (2014) 中 6.2.5.1 的要求；
- (5) SSC 和 HIC：符合 API 17J (2014) 中 6.2.4.2 的要求。

## 3.2.2.2 环氧树脂材料

用于试验的环氧树脂试样应在与注入端部配件时同样的温度和湿度条件下进行成模和固化。对于固化的环氧树脂评定试验要求如下：

- (1) 压缩强度：ASTM D695；
- (2) 剪切强度：ASTM D3410；
- (3) 玻璃化转变温度：ASTM E1356；
- (4) 流体兼容性：符合 API 17J (2014) 中 6.2.3.4 的要求；
- (5) 老化试验：符合 API 17J (2014) 中 6.2.3.5 的要求；
- (6) 固化度：DSC 测量符合 ASTM D5028 的要求。

## 3.2.3 试验方法

3.2.3.1 试验方法应符合 API 17J 的规定。若无相关规定，制造方可采用自定的方法和/或准则，或采用原材料供应方提供的方法。在这种情况下，试验方法和/或准则以及与材料用途相关的试验结果应形成书面文件。若未选用有明确规定的测试方法而是选择其他替代方法，制造方应在文件说明选用的试验方法等效或优于规定试验方法的原因。对于非标准测试方法应通过本社或业主的批准。应用与 ISO 或 ASTM 标准等效的试验方法无需进行额外论证。

## 第3节 原材料质量控制

## 3.3.1 一般要求

3.3.1.1 制造方的所有材料供应方应具备质量保证体系的书面文件。作为最低要求，原材料应通过 ISO 10474:2013, Certificate 3.1 认证。原材料应按表 3.3.1.1 的要求进行试验，试验结果应记入材料试验证书。

原材料质量控制最低要求

表 3.3.1.1

材料	试验	频率	说明
聚合物	黏度	每批一次 <sup>①</sup>	包覆层材料（仅PA-12和PA-11），测试程序依照ISO 307 <sup>②</sup>
	可萃取物	每批一次	仅对增塑材料
	杂质	每批一次	包覆层材料 <sup>③</sup> （除着色塑料外）
	密度	每批一次	包覆层材料（仅聚乙烯材料），测试程序依照ASTM D1505
	熔融指数	每批一次 <sup>①</sup>	包覆层材料，测试程序依照ISO1133/ASTM D1238
金属丝/带	化学成分	每炉一次	所有金属丝/带
	拉伸试验	每盘二次 <sup>④</sup>	所有金属丝/带
	弯曲试验	每盘二次	所有金属丝/带
	硬度试验	每盘二次	所有金属丝/带
	尺寸	每盘二次	所有金属丝/带；首尾取样；钢带遵循ASTM A480要求
端部配件	化学成分	每批热处理一次	主体材料
	拉伸试验	每批热处理二次	主体材料
	夏比冲击试验	每批热处理一组	主体材料，依照本指南3.2.2.1的要求
	硬度试验	每批热处理一次	主体材料，依照本指南3.2.2.1的要求
	射线检验	一次	仅在焊接颈部
	超声检验	一次	主体材料
	磁粉或液体渗透	一次	碳钢和低合金钢表面

环氧树脂	压缩试验		参见5.6.4.2
防屈曲层材料	拉伸试验	每批一次	仅针对纤维材料
	线性重量		

- 注：① 粘度和熔融指数仅测定一项即可，不对两项同时要求。
- ② 对于本条规定，ASTM D2857等效于ISO 307标准。
- ③ 塑料着色不作杂质评估。
- ④ 一盘卷指从相同的成型工艺、铸造工艺及热处理批次得到的连续金属丝。由于母材切割操作不改变机械性能，完成检验的母材经过切割分条后不需要进行机械性能试验。对为便于运输而采用的中间焊接，如分包商已按照制造方检验程序验证合格，则在缠绕到挠性管上时可保留。否则，须予以切除。

## 第4章 原型试验

### 第1节 一般规定

#### 4.1.1 一般要求

4.1.1.1 对于未经本社认可的新设计，应进行原型试验，并将文件提交本社进行审查。

4.1.1.2 若业主可接受未经原型试验验证的挠性管设计，作为原型试验的替代做法，制造方应提供客观证明资料或相似性评估证明产品满足设计要求，并提交本社进行审查。

4.1.1.3 原型试验应依据业主与制造方的协定，也可依据 API RP 17B 的推荐方法。

4.1.1.4 原型试验的项目和要求应考虑新设计的特点、应用条件、关键失效模式及风险后果。可参考 API RP 17B (2014) 中第 7.4 节的建议。

4.1.1.5 客观证明资料包括应用业绩、试验数据、技术出版物、有限元分析或验证性能要求的计算。相似性评估可参考 API RP 17B (2014) 中第 7.4.4 节的要求。

#### 4.1.2 试验的目的

4.1.2.1 试验主要有以下目的：

- (1) 评估新设计或已有设计的挠性管性能（如结构、功能、制造）；
- (2) 当挠性管应用超过先前的认证范围，需对已有挠性管设计进行认证。

#### 4.1.3 原型试验的种类

4.1.3.1 原型试验可以分为以下三类：

- (1) 第 I 类：标准试验；
- (2) 第 II 类：特定试验，通常用于验证特定的性能，如安装或操作工况的要求；
- (3) 第 III 类：仅用于描述管子性能特征的试验。

原型试验分类见表 4.1.3.1。

原型试验分类表

表 4.1.3.1

类别	类型	试验项目	说明
I	标准试验	(1) 爆破试验	通常用于直管
		(2) 轴向拉伸试验	在环境压力下
		(3) 压溃试验	可在外包覆层上打孔或去掉外包覆层
		(4) 温度试验	高温低温循环，仅适用于 PVDF
II	特定试验	(5) 挤压强度试验	安装工况试验
		(6) 拉弯组合试验	安装工况试验
		(7) 酸性环境试验	检验钢丝的性能衰减
		(8) 耐火试验	
		(9) 冲蚀试验	检验骨架层的性能降低
		(10) TFL 试验	包括通球试验
		(11) 外部密封系统试验	验证挠性管及端部配件的外部密封系统的充分性
		(12) 弯曲压溃试验	仅针对深水应用，验证挠性管弯曲影响
		(13) 排气阀试验	确认排气阀的短期和长期性能表现
III	特性描述	(14) 弯曲刚度试验	达到既定曲率
		(15) 扭转刚度试验	达到既定扭矩（非破坏性）

以及 其他试验	(16) 耐磨试验	外部磨损的试验
	(17) 急速卸压试验	
	(18) 轴向压缩试验	确定抗压缩刚度性能或判定是否发生鸟笼现象
	(19) 热性能/热交换系数试验	干湿条件均可
	(20) 极寒试验	低温试验
	(21) 耐气候性试验	耐紫外线性能
	(22) 内压循环试验	检验在内压载荷循环条件下内压密封层的内密封系统
	(23) 侧向屈曲试验	检验抗拉铠装层在压缩和弯曲工况下的抗屈曲性能
	(24) 冲击试验	

## 第2节 标准试验

### 4.2.1 一般要求

4.2.1.1 本节给出了第I类标准试验的试验目的、分析要求和验收标准,包括爆破试验、轴向拉伸试验、压溃试验和温度试验。

4.2.1.2 推荐的试验程序及可选附加做法可参考 API RP 17B (2014) 的第7.6节。

4.2.1.3 当非粘结挠性管应用于高温环境时,端部配件密封系统的设计非常关键,试验程序可参见 API RP 17B (2014) 的附录A。

### 4.2.2 爆破试验

4.2.2.1 爆破试验的主要目的是确定挠性管的抗爆破能力,包括以下单个或多个目标:

- (1) 验证挠性管能达到规定的设计压力;
- (2) 验证制造方给出的挠性管爆破压力;
- (3) 证明爆破压力设计方法及计算工具的有效性;
- (4) 验证设计方法及计算工具给出的挠性管承压的变形(轴向或径向)和扭转。

4.2.2.2 如内压可达到拟验证的压力值,则可采用非破坏性方法进行试验。

4.2.2.3 爆破压力的计算,包括管体的爆破压力和端部配件的爆破压力。计算时通常基于名义管径和可保证的最低材料性能。

4.2.2.4 如对管体设计进行验证,则需采用具有更高爆破压力的端部配件。

4.2.2.5 分析时,轴向力和弯曲对爆破压力的影响宜予以考虑,并提供预计结果与试验结果的对比。

4.2.2.6 非破坏性试验的验收标准:

(1) 如试验目的是为了验证挠性管可以达到规定的设计压力,试验显示的最大压力(即爆破压力)应大于1.5倍设计压力;

(2) 如试验目的是为了验证制造方给出的爆破压力,试验显示的最大压力应大于该给出的爆破压力。

4.2.2.7 为验证设计方法或计算工具的破坏性试验验收标准:

(1) 如管体和端部配件的爆破压力实测值均大于计算值,或管体和端部配件的压力在超过计算压力后均未发生破裂,则管体和端部配件的设计可接受;

(2) 如管体或端部配件的爆破压力实测值小于计算值,则该部分设计不可接受,更改该部分的设计或降低其抗压能力。

### 4.2.3 轴向拉伸试验

4.2.3.1 轴向拉伸试验的目的是确定挠性管的破断拉力,包括以下单个或多个目标:

- (1) 验证挠性管达到规定的抗拉能力;

- (2) 验证制造方给出的挠性管抗拉能力和端部配件锚固系统的能力；
  - (3) 验证设计方法和计算工具给出的管线伸长率、径向变形和扭转；
  - (4) 确定设计方法和计算工具给出的失效拉力。
- 4.2.3.2 如轴向拉力可增大到拟验证的拉力值，则可采用非破坏性方法进行试验。
- 4.2.3.3 挠性管和锚固系统的抗拉能力计算，应分别针对管体和端部配件进行计算。计算时，通常基于名义的管道尺寸和可保证的最低材料性能。
- 4.2.3.4 分析时，宜对以下内容予以考虑，并提供预计结果与试验结果的对比。
- (1) 内压对拉伸失效的影响；
  - (2) 防止端部旋转的端部固定对于拉伸失效的影响。
- 4.2.3.5 非破坏性试验的验收标准：
- (1) 如试验目的是为了验证挠性管可达到指定的轴向拉力，则在低于该指定的轴向拉力时不能发生失效；
  - (2) 如试验目的是为了验证制造方给出的挠性管抗拉能力和端部配件锚固系统能力，则在低于该给出值时不能发生失效。
- 4.2.3.6 为验证设计方法/计算工具的破坏性试验验收标准：
- (1) 如管体和端部配件的失效拉力实测值均大于计算值，或管体和端部配件的拉力在超过计算拉力值后均未能发生失效，则管体和端部配件的设计可接受；
  - (2) 如管体或端部配件的失效拉力实测值小于计算值，则该部分设计不可接受，更改该部分的设计或降低其抗拉能力。

#### 4.2.4 压溃试验

4.2.4.1 压溃试验的主要目的是确定管道在受到外部压力时抵抗压溃的能力，包括以下单个或多个目标：

- (1) 验证挠性管可用于指定的设计水深；
  - (2) 验证制造方给出的挠性管抗压溃能力；
  - (3) 验证压溃压力的设计方法和计算工具。
- 4.2.4.2 如承受的外压可增至拟验证的压力值，则可采用非破坏性方式进行试验。
- 4.2.4.3 静水压力试验也可用于验证端部配件的内密封系统在外压下具有足够的能力。
- 4.2.4.4 分析时，宜对弯曲和椭圆度对压溃压力的影响予以考虑，提供预计结果与试验结果的对比。
- 4.2.4.5 非破坏性试验的验收标准：
- (1) 如试验目的是为了验证管线可用于指定水深，则在低于该指定设计水深除以使用系数（截面设计时采用）所得压力时，不能发生失效；
  - (2) 如试验目的是为了验证制造方给出的抗压溃能力，则在压力低于给出值之前不能发生失效。
- 4.2.4.6 对于破坏性试验：
- (1) 压溃压力应不低于本指南中规定的设计要求；
  - (2) 如试验目的是为了验证设计方法或计算工具，则压溃压力不应小于预测的压溃压力。
- 4.2.4.7 如压力大于设计要求时，管道未发生压溃，或者发生不是由压溃引起的失效，则该挠性管设计也可以接受。

### 第3节 特定试验

#### 4.3.1 一般要求

4.3.1.1 本节给出特定试验的试验目的、分析要求和验收标准，包括挤压强度试验、拉弯组合试验、耐酸性试验、耐火试验、冲蚀试验、过出油管器试验、外部密封系统试验、排气阀试验。

4.3.1.2 推荐的试验程序及可选附加做法可参考 API RP 17B (2014) 中第 7.7 节。

### 4.3.2 挤压强度试验

4.3.2.1 挤压强度试验的目的是为了确定挠性管的抗挤压能力, 包括以下单个或多个目标:

- (1) 验证挠性管指定的安装限制条件;
- (2) 验证制造方给出的抗挤压强度;
- (3) 验证挤压设计方法及计算工具。

#### 4.3.2.2 挤压强度试验的验收标准:

(1) 如试验目的是验证挠性管适用于指定的安装设备, 则卸载后测量的椭圆度应满足规定的使用系数的要求, 并考虑指定的最大水深。

(2) 如试验目的是验证制造方的设计方法, 则实测最大挤压载荷应大于设计预测值。

(3) 如试验目的是为了验证制造方给出的挤压强度, 则根据卸载后测量的椭圆度的抗挤压能力计算值, 应满足本指南中使用系数的要求, 并考虑指定的最大水深。

4.3.2.3 挤压强度试验完成后可以进行压溃试验。

4.3.2.4 分析时, 宜对轴向拉伸载荷对挠性管挤压强度的影响予以考虑。

### 4.3.3 拉弯组合试验

4.3.3.1 拉弯组合试验的目的是当挠性管采用水平拉力或卷轴提供拉力的安装方式时对安装设计进行验证。

4.3.3.2 试验模拟铺管船上滚轮或槽型托管架上的挠性管。在试验中, 试样可以不包括生产型的端部配件, 其端部构件仅需具有将轴向拉力传递至挠性管上的能力。

#### 4.3.3.3 拉弯组合试验的验收标准:

挠性管外径的变化应在制造方和业主基于制造设计预测的范围内, 满足最小许用值的要求。

(1) 如挠性管可以在解剖后进行测量, 则椭圆度的衡准也可以基于挠性管的内径;

(2) 如设计值在计算时考虑了压溃等因素, 则在拉弯组合试验中也可以接受更大的椭圆度。

4.3.3.4 分析时, 宜对不同滚轮弯曲半径和轴向拉力对管线变形的影响予以考虑。

### 4.3.4 酸性环境试验

4.3.4.1 酸性环境试验目的是为了验证全尺寸管线在代表操作工况的酸性环境条件下的性能。该试验用于在包含钢带/钢丝的挠性管环空空间内产生真实的酸性环境, 也用于通过弯曲管线模拟钢丝/钢带的载荷条件。

#### 4.3.4.2 酸性环境试验的验收标准:

对于静态管线试验, 考虑由于腐蚀导致爆破压力在服役期内的降低, 基于此预测的管道在服役期内的爆破压力不应小于设计压力除以截面设计时所用的许用系数。

4.3.4.3 分析模型宜考虑制造方和业主在试验前认可的腐蚀速率和加载条件(包括环空环境和使用寿命评估)。

### 4.3.5 耐火试验(如适用)

4.3.5.1 如管道的应用环境有耐火要求, 应进行耐火试验。

4.3.5.2 耐火试验的目的是为了确定挠性管在特殊火灾情况下失去密闭性的时间。耐火性能通过管道结构设计的方式, 或采用非整体的被动防火措施达到耐火性能。

4.3.5.3 耐火试验的验收标准: 生存时间应满足设计要求。

### 4.3.6 冲蚀试验

4.3.6.1 冲蚀试验的目的是为了确定挠性管最内层在代表(或保守考虑)设计工况的流动条件下的冲蚀速率。

4.3.6.2 冲蚀试验的验收标准:

冲蚀速率需保证管道的压溃压力在使用寿命期内不会降至低于设计值。此外,光滑管的内压密封层厚度在使用寿命期内不能降至低于设计值。

4.3.6.3 分析时,试验流体组分、流速及管线弯曲半径的变化对冲蚀的影响宜予以考虑。

#### 4.3.7 过出油管试验(如适用)

4.3.7.1 过出油管试验目的是为了验证过出油管泵送设备可以完全通过挠性管,并确定由于该设备反复通过所引起的挠性管磨损率。

4.3.7.2 过出油管试验的验收标准:

过出油管测径规工具能够从任一方向自由通过管线(详见 API 17C 中测径规的尺寸、力和压力)。在试验完成后,宜对工具和管线内部的有害磨损或损伤进行检查。

#### 4.3.8 外部密封系统试验

4.3.8.1 外部密封系统试验的目的是为了验证当试样受到代表典型管线铺设的轴向拉力时非粘结挠性管端部配件的外密封系统的充分性。

4.3.8.2 外部密封系统试验的验收标准:

在 24 小时内不能发现泄漏。试样解剖后不能检测到有进水。

#### 4.3.9 排气阀试验

4.3.9.1 排气阀试验的目的是为了确认排气阀的长期性能。

4.3.9.2 每种排气阀类型的代表试样应进行包含下列项目在内的验证试验。制造方应确定每种试验的试样,以保证试验结果的一致。下列的每种试验中,每种排气阀至少要有三个试样。

4.3.9.3 高温浸没试验

(1) 试验目的:

该试验目的是为了验证排气阀长期暴露于高温后的性能。

(2) 验收标准:

打开和关闭压力应满足设计要求。

4.3.9.4 循环试验

(1) 试验目的:

该试验目的是为了验证,当外部环境(出气阀处)压力持续等于管线指定水深的静水压力时,在进气压力循环后,阀的打开和关闭压力的可重复性。

(2) 验收标准:

打开和关闭压力应满足设计要求。

4.3.9.5 长期海水浸没试验

(1) 试验目的:

该试验目的是为了验证阀在长期暴露于海水后的性能。

(2) 验收标准:

打开和关闭压力应满足设计要求。

4.3.9.6 模拟海底浸没试验

(1) 试验目的:

该试验目的是为了验证阀试样在因海水和砂石引起的退化后,打开和关闭压力的可重复性能。

(2) 验收标准:

打开和关闭压力应满足设计要求。

4.3.9.7 外部密封压力试验

(1) 试验目的:

该试验的目的是为了验证阀的外部密封系统抵抗海水浸入的能力。

(2) 验收标准:

在阀开启/关闭循环十次之后没有水进入。此外,应对阀的内部和外部进行检查。不允许有腐蚀和磨损。打开和关闭压力应满足设计要求。

#### 4.3.9.8 流通试验

##### (1) 试验目的:

该试验的目的是为了获得阀的特性曲线(即阀的流量与内压的关系),并验证其符合设计前提。

##### (2) 验收标准:

排气阀设计中规定的流量,应可以使环空中的气体全部排出,同时管线外覆盖层没有永久变形。测量的流量应满足设计前提的要求。

### 第4节 特性描述试验及其他试验

#### 4.4.1 一般要求

4.4.1.1 本节给出特性描述试验及其他试验的试验目的、分析要求和验收标准。

#### 4.4.2 热交换系数试验

4.4.2.1 热交换系数试验目的是为了验证用于预测挠性管传热系数的设计工具/方法。

4.4.2.2 热交换系数试验的验收标准:试验测得的热交换系数应等于或小于制造方的预测值。

## 第5章 制造检验

### 第1节 质量保证要求

#### 5.1.1 一般要求

5.1.1.1 制造应依据制造方的制造规格书和质量计划进行，书面制造规格书应符合本章的要求。要求进行验证的制造工艺，包括焊接、热处理、涂层，应符合本章的要求。制造方应保存工艺验证的文件，以便业主或本社进行检查。

5.1.1.2 无损检验（NDE）应依据 ASTM、ISO 或者等效的标准的要求进行。

5.1.1.3 对于原材料的质量控制，应符合本指南 3.3 节的规定。

#### 5.1.2 过程控制

5.1.2.1 制造过程中所有的主要工序应经过检测。制造方的质量计划应规定检测点、检测方式和验收标准，所有检测结果均应记录并保留。对于制造过程中的不合格项应记录。对不合格项采取的措施及记录应通过业主和本社的检查且保存于完工制造文件中。过程控制至少应包括以下内容：

(1) 骨架层：钢带的预制和缠绕，钢带焊接，骨架的冷成型，骨架层成品的盘卷，预热，以及挤塑前的干燥；

(2) 聚合物层：原料干燥，挤塑，聚合物层的冷却，挤塑后产品的盘卷；

(3) 抗压铠装层：原料钢丝/钢带准备，管体进给，抗压铠装层的缠绕，异型材/平钢带焊接，该层成品盘卷；

(4) 抗拉铠装层：原材料钢丝准备，管体进给，钢丝缠绕，钢丝焊接，该层成品盘卷；

(5) 防屈曲层：防屈曲带的缠绕；

(6) 端部配件：组装过程，金属层的预制和铠装钢丝/钢带的冷/热成型，树脂的注入。

5.1.2.2 如制造中出现超过经评定的制造工艺的情况，制造方应对此进行评估并判断是否需要进行纠正；如需纠正，应制定并证明纠正措施合理，并确定验收标准。

5.1.2.3 在制造过程中，制造方应采取措施确保所有的检测结果在制造公差内。

#### 5.1.3 制造过程中的装卸

5.1.3.1 制造方应有文件说明在制造、包装、存储过程中对半成品或成品的装卸程序。该程序应确保挠性管在上盘缠绕/退绕或端部配件安装过程中因磨损、机械损伤、扭曲、弯曲、挤压而造成的任何异常均不超过制造公差的要求。

5.1.3.2 制造方应确保所有的立式盘、卧式盘、导向和辊轴等不对挠性管造成任何损伤。应对挠性管包装的重心进行检查，防止造成意外/不可控的不平衡、转动风险。

5.1.3.3 制造方应保证管体和端部配件均不被异物污染。

5.1.3.4 制造方在将扁平或成型钢带从供货商的立式盘重新缠绕至制造方的立式盘或绕筒时，应采用文件规定的操作程序。

### 第2节 骨架层

#### 5.2.1 一般要求

5.2.1.1 骨架层的制造应符合制造方规定的程序，且符合本节的要求。

5.2.1.2 在每次骨架层生产的开始和结束处对骨架层剖面形状进行检查，应符合制造方的验收标准，并进行记录。在成型的骨架层中，应避免出现尖角。

5.2.1.3 对于骨架层是分段制造或将两段对接（如修复时）的情况，应对这些分段的连接程序进行验证，满足连接点所在位置的所有预期载荷的要求，并以文件记录。制造方应在

制造质量计划中明确两个对接焊缝之间的最小间距。骨架层的焊点应避免出现在曲率过大的位置（如弯曲加强器区域）。

### 5.2.2 检验和验收标准

5.2.2.1 骨架层的检验和验收标准见下表 5.2.2.1。

检测项目	验收标准	检测频次
外观	表面无凹陷、开裂、擦伤、刮花、腐蚀、剥落、起皮；剖面自锁完好；	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
外径	满足设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
外径椭圆度	满足设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
节距	满足设计要求	该层的起始和结束分别取样测量；给出一段长度内的平均节距
焊口外观	无弧坑、无咬边、无焊瘤、无烧穿、无错边	每道焊口

剖面自锁应有足够的运动自由度，以防止出现超出许用值的交变应力。外观检测应检查是否存在剖面自锁失效。制造方应规定剖面自锁的允许运动自由度的验收标准。

## 第 3 节 聚合物挤塑层

### 5.3.1 一般要求

5.3.1.1 聚合物层的制造应符合制造方规定的程序，且符合本节的要求。

5.3.1.2 制造方应确保聚合物挤塑层没有出现褶皱，并以文件记录。

5.3.1.3 对于粗糙管（有骨架层的挠性管），制造方应确保所有挤塑层下面一层的外表面符合制造方挤塑程序的要求。在挤塑过程中，制造方应确保骨架层的节距在规定的公差内。

5.3.1.4 在聚合物挤塑过程中，以下过程参数应与制造方的规定一致：

- (1) 原材料的湿度控制设备的温度和压力（露点）；
- (2) 挤塑机螺杆转速；
- (3) 挤塑机机筒温度；
- (4) 挤塑机机筒压力；
- (5) 挤塑机十字机头的温度；
- (6) 挤塑机十字机头的压力；
- (7) 运行的线速度；
- (8) 冷却水温度。

5.3.1.5 在开始挤塑加工之前，制造方应测量并确保吸湿材料的含水率在供应方规定的范围内。如使用了 PA 或 TPE，其含水率应按照 ASTM D789（或 ASTM D6869）程序进行检测，并符合制造方的规定。

5.3.1.6 为了排气目的在中间层穿孔的程序和工具，应不使其底层结构产生缺陷。

5.3.1.7 切割程序应以文件证明其不会引起初始裂纹或其他因素使切割区域弱化，避免丧失挤塑层的功能要求。

5.3.1.8 在制造过程中，制造方应编制制造程序文件，以控制下列工艺（如适用）：

- (1) 表面打磨；

- (2) 塑化剂移除;
- (3) 交联反应;
- (4) 应力消除;
- (5) 其他需要验证的工艺。

### 5.3.2 检验和验收标准

#### 5.3.2.1 外观和尺寸检验

挤塑层的外观和尺寸检验，见表 5.3.2.1。

挤塑层的外观和尺寸检验

表 5.3.2.1

检测项目	验收标准	检测频次
外观	无孔洞、无气泡、无严重划伤、无碳化、无杂质、无凸起凹陷、无合料纹、无夹杂（黑点），瑕疵的最大范围是剩余厚度至少等于设计的最小厚度	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
壁厚	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
外径	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
椭圆度	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
孔洞	没有孔洞	连续

扣除缺陷或缺陷总和后的剩余厚度应至少等于该层的设计最小厚度。

#### 5.3.2.2 试验要求

对于在金属层上挤塑的内压密封层，应进行连续的高压电火花检测或等效设备检测，检测设备应至少能检测出 1mm 的孔洞，且检测器应有音频报警装置。在聚合物材料挤塑及达到挤塑厚度前，应对漏点检测器进行校准。

在内压密封层和外包覆层每次挤塑时，在开始和结束挤塑段最少取三个试样，进行极限强度和断裂伸长率试验。对于内压密封层采用 PA 材料时，应依据制造方的程序进行 CIV 检测，用交联聚乙烯 XLPE 材料须检测交联度。所有试样应在室温中存放至少 6 小时后进行测试。所有检测结果应符合制造方的规定，并进行记录。

## 第 4 节 抗压/抗拉铠装层

### 5.4.1 一般要求

5.4.1.1 抗压/抗拉铠装层的制造应符合制造方规定的程序，且符合本节的要求。制造程序应包括抗压铠装层、抗拉铠装层的缠绕程序，并保证扁平、圆形或成型钢丝的缠绕满足设计要求。制造程序还应包含钢丝/钢带缠绕前的状态要求和缠绕后的状态要求，以确保该层和内、外相邻层满足制造规格书要求。

5.4.1.2 制造程序应规定监测的参数、允许公差、监测和记录的间隔。在制造过程中，应检查抗压/抗拉铠装层钢丝的翘起（形成鳞爆），避免超过允许的公差要求。

5.4.1.3 所有焊缝应沿挠性管轴向交错排列，且焊缝之间的最小距离符合制造方的规定。

5.4.1.4 抗压铠装层的焊接点应避免位于悬挂点、触地点等敏感区。

## 5.4.2 检验和验收标准

5.4.2.1 抗压/抗拉铠装层的制造检验和验收标准见表 5.4.2.1。

抗压/抗拉铠装层的制造检验和验收标准

表 5.4.2.1

检测项目	验收标准	检测频次	备注
外观	表面无擦伤、无腐蚀，无叠加、无严重鳞爆、无凹陷、无开裂	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定	
节距	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定	
外径	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定	对于抗压铠装层还需测量周长
椭圆度	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定	只适用于异型钢生产的抗压铠装层
焊口外观	无弧坑、无咬边、无焊瘤、无烧穿、无错边	每道口	
焊口质量	符合要求	每道口	

## 第5节 保温层

## 5.5.1 一般要求

5.5.1.1 保温层的制造应符合制造方规定的程序，且符合本节的要求。制造程序应包括对带状缠绕叠加的控制和监测要求，以及缺陷判别的验收标准。

## 5.5.2 检验和验收标准

5.5.2.1 保温层的检验和验收标准见表 5.5.2.1。

保温层的检验和验收标准

表 5.5.2.1

检测项目	验收标准	检测频次
外观	表面无严重擦伤、无叠加、无严重鳞爆、无凹陷、无开裂	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
节距	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定
外径	符合设计要求	开始 50m，1 次/10m；以后的间隔根据制造方规定

## 第6节 端部配件

## 5.6.1 一般要求

5.6.1.1 在端部配件的制造、加工、组装以及检测过程中，所有的环节操作应满足制造方的规定，且符合本节的要求。加工尺寸应符合图纸要求。

5.6.1.2 端部配件的所有操作人员应根据制造方已批准的操作程序进行培训，持证上岗。

相关资质证明应可供业主或本社审查。

### 5.6.2 端部配件装配

5.6.2.1 在端部配件安装之前,应对所有暴露的表面进行清洁、干燥和外观检查,确保符合规格书的要求。

5.6.2.2 如抗拉铠装层成型时使用的润滑剂会对钢丝在端部配件内的固定产生不利影响,则在端部配件安装前应将润滑剂完全去除。

5.6.2.3 如需对端部配件密封圈下面的内压密封层进行加工处理时,任何机械加工均不能引起该区域出现不能接受的缺口或导致内压密封层厚度降低至小于最小设计值。制造方应给出该区域的椭圆度、壁厚变化和表面粗糙度的验收标准。

5.6.2.4 为防止焊接过程中环氧树脂或聚合物层过热,应确定控制要点并形成文件。

5.6.2.5 用来永久固定铠装钢丝/钢带的任何焊接程序(如对接焊)都应控制其焊接条件。所有的焊接表面应打磨平滑并检查有无裂纹,避免对邻近层或部件造成损坏。

5.6.2.6 在环氧树脂混合前,所有填充设备都应该经过检查以保证正常运行。环氧树脂的混合和调整都应根据供货方的规格书进行。填充操作应避免产生不可接受的空隙。端部配件位置的排气管不能被环氧树脂阻塞。任何要求加热端部配件以固化环氧树脂的处理过程,应进行适当的温度控制。

5.6.2.7 在端部配件安装中,所有改变抗拉铠装层钢丝机械和几何特性的成型操作,都应进行控制和记录。钢丝的成型操作应以模具作为引导控制其弯曲半径,应控制抗拉铠装层钢丝的方向和间隙。如在成型中有加热操作,应控制其加热温度。

5.6.2.8 制造方的端部配件制造规格书中,应规定铠装层的切割控制程序和端部配件装配部件的尺寸控制程序,以确保在后期静水压试验和操作中内压密封层的蠕变不超过本指南表2.6.1.1中的要求。

### 5.6.3 检验和验收标准

5.6.3.1 对于端部配件组装,应在进行外观检查、尺寸检测和部件识别时设置控制点。应对所有检测结果进行记录。

5.6.3.2 对于需要特定的紧固力或是扭力的部件,应确保使用适宜的和经过校准的仪器进行控制。

5.6.3.3 制造方应采用经验证且形成文件的注入程序,并注入充足的环氧树脂,以避免端部配件内存在影响功能特性的空隙。环氧树脂注入控制应至少包括成分、混合过程、注入时间和固化时间,应对注入量进行检查。

### 5.6.4 试验要求

5.6.4.1 对于端部配件部件的最低试验和检测要求见表 5.6.4.1。所有结果均应满足制造方规格书的要求。

端部配件试验和检测要求

表 5.6.4.1

检测部位	验收标准	检测要求
所有表面	符合设计要求	100%外观检测
碳钢和低合金钢表面	符合设计要求	100%磁粉检测或渗透检测
堆焊层表面	符合设计要求	100%渗透检测
端部配件本体	符合设计要求	100%超声波检测
环焊缝	符合设计要求	100%射线检测
涂层	符合设计要求	(1) 油漆和环氧树脂需检测厚度和附着力。 (2) 电化学沉积涂层需检测化学成分、金属材料 and 涂层之间交互作用处的金相、渗透。

5.6.4.2 环氧树脂注入结束时,应从注入端部配件的同一混合物中至少提取出三个样品。根据 ASTM D695 进行压缩强度试验,试验的结果应在制造方规定范围内。

### 5.6.5 连接器

5.6.5.1 所有端部配件连接器和部件应符合 API 6A, API 17D, 其他工业认可标准, 以及业主规定的要求。

## 第 7 节 需要验证的工艺

### 5.7.1 焊接

#### 5.7.1.1 资质

所有的焊接操作都应由有资质的焊接人员根据制造方认可的程序进行。焊接工艺规程 (WPS)、焊接工艺评定记录及焊工资质都应以文件进行备案, 可供业主及本社审查。焊接工艺应经本社审批, 焊工资质也应提交本社审查。如制造方采用自动焊或仅用于辅助制造的焊接, 焊工资质的第三方认可, 可以用具有 ASNT II 级资质人员的检验来替代。业主及本社可以根据制造方通知的时间查看所有焊接程序和人员资质。焊工和焊接工艺的评定应以下标准进行: ASME 锅炉和压力容器第 IX 章, 或 EN287-1, 或 ISO13847, 或其它相同等级的标准。焊接程序应包括验收标准。

作为最低要求, 对于带状钢带、圆截面钢丝或成型钢丝应用于非酸环境时的质量鉴定试验, 应包含外观检查、磁粉检测、双拉伸试验、单面或双面导向弯曲测试。焊接拉伸测试的极限拉力值应等于或大于制造方设计规格书中要求的最小值。最小的拉力值应包括在焊接工艺规程中。

在导向弯曲试验时, 应采用合适直径的芯轴以在焊接区域产生足够大的应力来验证焊缝质量。在酸性环境应用时, 除了以上测试, 还应进行宏观检查和硬度测试。宏观检查前应进行抛光、酸蚀, 并至少以 10 倍放大检查。硬度测试应是在同一试样上进行。测试至少应包括焊接熔合区、热影响区、热影响区的边缘、不受任何影响的母材。硬度测试的方法可参照 HV5 或 HV10 (ISO 6507-1) 或 HV500 (ASTM E384)。试验结果应符合制造方规格书的要求。

#### 5.7.1.2 金属层

每当焊机的配置发生变化时, 应至少进行两次试焊以验证配置。试样应经过生产中的全部热处理。试样焊缝应至少进行以下试验:

- (1) 极限强度;
- (2) 硬度 (酸性环境下);
- (3) 弯曲;
- (4) 渗透或磁粉检测;
- (5) 根据以下规定进行外观检测。

在弯曲试验后, 应对非磁性合金进行渗透试验, 对磁性钢进行磁粉检测。对于位于弯曲外表面的焊接热影响区, 可以采取放大 5 倍的外观检测代替磁粉检测。对于冷加工变形最大的区域, 应进行硬度测试。对于骨架层钢带的焊接, 只需要进行外观检查。所有的试验结果都应进行书面记录, 并应在符合制造方规格书要求的范围内。

生产焊缝应沿全部带宽具有平滑表面, 并且显示全焊透。钢带的焊接处应无弧坑、烧穿等缺陷。焊缝厚度应至少为板厚且最大允许高出原材表面 1mm (0.04 in)。焊缝沿钢带应形状一致并在焊趾处无咬边。对于成型后的骨架层间的焊缝, 制造方应确保所有焊接表面光滑, 以防止对相邻层造成损伤。

对于骨架层/铠装层钢带/钢丝的对接焊缝以及成型后的骨架层间的焊缝, 应进行以下检测:

- (1) 骨架层钢带的焊缝: 100%外观检查;
- (2) 成型后的骨架层间的焊缝: 100%外观检查;
- (3) 铠装层钢丝/带的焊缝: 100%外观检查和磁粉检测。

在钢材通过机械成型工具之前, 应进行 100%的外观检查。在通过成型工具后, 也应进行焊接外表面的裂纹检测。不允许有裂纹产生。

成型钢丝的对接焊应采用自动或半自动焊接设备。

#### 5.7.1.3 聚合物层

本指南 5.9 节允许的聚合物层补焊，应按照经制造方验证的程序进行，且该程序应可供业主和本社审查。焊接程序应包括验收标准。

对于聚合物补焊的检测，应检查壁厚和表面状况是否符合制造方规格书的要求。

#### 5.7.1.4 端部配件

所有环焊缝和堆焊应根据经审批的书面程序进行，检测和试验应符合 5.6.4 的要求。

### 5.7.2 热处理

5.7.2.1 对于钢丝和冷加工或锻造的构件，为了满足强度、可成型性或 NACE 适应性的要求而进行的热处理，应根据制造方的规格书执行。热处理的程序和图表文件等应由制造方或分包商保存，以便业主及本社审查。

### 5.7.3 涂层

5.7.3.1 用于防止端部配件部件在其内、外环境或环空中发生腐蚀的涂层，应符合制造方程序的规定，该程序应包括验收标准。

5.7.3.2 端部配件涂层的工艺质量评定程序，应至少包括以下内容：

- (1) 电镀液组分；
- (2) 热处理的温度和时间控制；
- (3) 涂层的硬度试验；
- (4) 涂层的附着力试验；
- (5) 采用光学显微方法或推荐的类似方法分析涂层表面的横剖面；
- (6) 涂层厚度测量；
- (7) 测定涂层对于腐蚀物的抵抗能力的试验（如海水和二氧化碳）；
- (8) 检验表面涂层瑕疵的程序；
- (9) 涂层的修复方法及质量评定（如适用）。

## 第 8 节 制造公差

### 5.8.1 一般要求

5.8.1.1 制造方应以文件形式给出用于挠性管各层的制造公差。这些公差应在设计过程中被验证是可接受的，规定公差内的变化及符合本指南 2.5 要求的利用率改变不对挠性管和各层结构的功能产生影响。应至少规定以下参数的公差：

- (1) 骨架层：外径、椭圆度、鳞爆；
- (2) 聚合物层：壁厚、外径、椭圆度（光滑管）；
- (3) 抗压和抗拉铠装层：外径、抗压铠装层椭圆度、节距（或角度）、鳞爆；
- (4) 抗拉铠装层：外径、节距（或角度）、鳞爆；
- (5) 保温层：外径；
- (6) 防屈曲层：节距（或角度）和与相邻层的重叠量。

5.8.1.2 制造方应规定挠性管长度的公差。

5.8.1.3 对于没有抗压铠装层的挠性管，制造方应文件说明抗拉铠装层钢丝的间隙控制符合设计要求。

5.8.1.4 如尺寸的验收标准是基于制造能力而不是基于设计考虑的，制造方应以文件说明该验收标准符合设计要求。

## 第9节 修补

### 5.9.1 一般要求

5.9.1.1 制造方应编制修补程序并经验证，并可供业主和本社审查。制造方应通过试验或计算证明挠性管的修补不影响管体的结构要求或长期使用要求。

5.9.1.2 内压密封层不允许修补。该层若发现不可接受的缺陷，则应将整层去除。去除程序应提交业主及本社审查。内压密封层的表面不连续或局部超厚，可以采用机械加工去除，但应保证最终壁厚在规定的公差范围内且达到合适的表面抛光。

5.9.1.3 非承压作用的中间包覆层或外包覆层的小瑕疵是允许修补的。聚合物层的焊接应根据本指南 5.7.1.3 节的规定进行。所有修补，包括外包覆层的海上修补，应根据经批准的程序进行，且不能对相邻层造成缺陷。业主及本社可以对所有修补进行检查。外包覆层的修补不应造成保温层损坏，使总热传递系数超过业主和本指南 2.10.3 节的要求。

5.9.1.4 金属铠装层焊接的任何缺陷应通过切除焊接部位和热影响区进行修补，根据规定的程序重新焊接。骨架层的焊接修补是允许的，但应采用经验证的修补程序并通过外观检查确认其可接受。焊接修补的检测要求应根据本指南 5.7.1 节的规定。

5.9.1.5 表面保护涂层损伤的修补程序应可供业主及本社审查。

5.9.1.6 对接焊缝的修补应符合 API 6A 中产品规格等级 2 和等级 3 的所有适用要求，除非业主明确说明产品规格为等级 4。

5.9.1.7 缺陷去除操作应不对其底层结构造成损伤。去除挤塑层时应给予特别注意，避免刀具与其下的铠装层接触。

## 第10节 工厂接受试验

### 5.10.1 一般要求

5.10.1.1 挠性管应经过工厂接受试验，包括测径、静水压试验、电连续性和电绝缘试验以及排气系统试验。

5.10.1.2 所有挠性管均应进行水压试验。有阴极保护的挠性管应进行电连续性试验和电绝缘试验。测径试验和电绝缘试验仅适用于粗糙管。挠性管端部配件处有气体释放阀或排气口时，应进行气体排放系统试验。

5.10.1.3 制造方应规定从端部配件安装完成（包括环氧树脂的混合）至试验开始之间的最短时间。试验程序应符合该最短时间的要求。

5.10.1.4 工厂接受试验的试验程序可参考 API Spec 17J 的有关要求。

5.10.1.5 应提交每个验收试验的报告。如试验不满足验收标准，应调查原因，并提交报告，报告应包括改正措施。

### 5.10.2 测径试验

5.10.2.1 通过测径试验，检测挠性管是否有阻塞和严重变形。

#### 5.10.2.2 验收标准

清管器应可通过挠性管内腔并不对管道造成损伤。轻微的划痕或磨损可以接受，但不能产生凹痕。

### 5.10.3 静水压试验

5.10.3.1 通过静水压试验，确保挠性管能够在预期的压力水平上保压或者识别管体潜在的缺陷。

5.10.3.2 当挠性管用作海底管道及水下跨接管时，最小试验压力应为 1.3 倍的设计压力。静水压试验稳压时间应不少于 24 个小时。在试验期间，压力和温度（环境和内部）应至少每 30 分钟记录一次。

#### 5.10.3.3 验收标准

(1) 24 小时试验时间内,所有压力波动导致的压降应不超过试验开始时压力值的 4%,产生压力波动的原因包括管中的残存空气、管道体积或直径的变化、外部的温度波动、增加或减少的额外试验液体。

(2) 压力试验过程中挠性管应没有泄漏。

(3) 在端部配件区域,应不出现永久变形或损伤。

#### 5.10.4 电连续性和电绝缘试验

5.10.4.1 通过电连续性试验,确保管体阴极保护系统的有效性。通过电绝缘试验,确保骨架层与终端之间的电绝缘。

##### 5.10.4.2 验收标准

(1) 对于电连续性试验,端部配件之间的电阻应小于  $10\Omega/\text{km}$  (对于长度小于 100m 的跨接管道,电阻应小于  $1\Omega$ )。

(2) 对于粗糙挠性管的电绝缘试验,内部骨架层和端部配件之间的电阻应大于  $1\text{k}\Omega$ 。

#### 5.10.5 排气系统试验

5.10.5.1 通过排气系统试验,确保排气系统(包括用于释放环空内积聚气体的阀门)在静水压试验之后和最终包装之后功能正常。

##### 5.10.5.2 验收标准

(1) 应分别确认所有排气口的气体流动通道。

(2) 所有阀门应在制造方规定的释放压力时释放气体。

## 第 11 节 标识

#### 5.11.1 一般要求

5.11.1.1 应在挠性管管体和端部配件设置标识。标识内容包括:

- (1) 采用的标准名称;
- (2) 挠性管编号;
- (3) 挠性管制造方名称;
- (4) 制造日期;
- (5) 设计压力;
- (6) 储存最小弯曲半径;
- (7) 纵轴线标记;
- (8) 抗扭刚度的弱方向;
- (9) 设计水深。

除此之外的其他标识可参考 API 17B 的相关要求。

5.11.1.2 应在管线的对边位置标识管线长度且最大间隔为 10m。标识应足够大且显著,能够被清晰地辨认。

## 第6章 储存、运输与安装检验

### 第1节 储存

#### 6.1.1 一般要求

6.1.1.1 挠性管宜储存在不影响其性能特征的环境条件下。

6.1.1.2 管道长期储存将会引起挠性管聚合物层产生一个永久的弯曲。这种弯曲情况宜在安装计划中加以考虑。

6.1.1.3 在储存期间,宜尽量减少搬运。挠性管在储存过程中宜进行全面而彻底的检查,并向业主及本社提供检查报告。

6.1.1.4 在储存期间进行维修操作时,宜按照生产过程的需要来提供永久或临时遮盖物以及环境控制的设施。在存储区域进行任何操作宜严格控制并且选择不损坏、不污染产品的方法进行。挠性管的储存区域宜得到业主及本社的认可并应选择不易损坏挠性管的区域。

#### 6.1.2 储存方式

6.1.2.1 挠性管的主要储存方式有立式盘和卧式盘。立式盘和卧式盘应特别注明制造方、编号、法兰及盘直径、宽度、空载重量及承载能力。

6.1.2.2 绕水平轴旋转的立式卷盘是存储较长挠性管最常用的设备。卷曲过程中施加到挠性管的张力宜足以防止管道在存储时松弛,否则将导致挠性管在绕退时损坏。

6.1.2.3 绕垂直轴旋转的卧式盘经常用于超长挠性管的储存。

### 第2节 运输

#### 6.2.1 装卸

6.2.1.1 在挠性管装卸和运输过程中,宜采取预防措施来防止挠性管的损伤。

6.2.1.2 通常采用专用设备进行装卸,如:铺设张紧器和设备,立式盘和卧式盘,舷外托架,编织式套管等。

6.2.1.3 所有装卸设备宜满足如下要求并选择最佳的海上作业方式:

- (1) 设备的使用应符合国际或国家标准的规定并满足认证要求;
- (2) 设备不使用时要进行维护保养以防止其损坏和老化;
- (3) 在使用之前要检验是否有损坏和老化的迹象。

#### 6.2.2 运输

6.2.2.1 任何半成品或者生产成品在除制造过程之外的所有运输过程中宜选择尽量减少装卸次数和挠性管损坏机率的运输设备。可以将挠性管存储在容器中后固定,也可以直接装盘卷或者散装在运输甲板上,宜对挠性管做好必要的保护措施。

6.2.2.2 装船包含从挠性管陆地吊装或过驳至船甲板上直至船舶离开码头的过程。在装船前及装船过程中宜对所有的挠性管进行外观检查。该项检查宜由制造方、业主、安装或运输过程的现场代表来实施。该检查宜进行全面的记录并且得到上述各方代表的签字认可。

6.2.2.3 装船固定的设计应在装船之前得到批准和认可,在航行前所有的固定工作应按照相应的设计规范进行验证。

### 第3节 安装检验

#### 6.3.1 安装工艺和程序

6.3.1.1 挠性管安装可以采用立式盘或者卧式盘的方式进行，端部回接可以采用拖拉方法进行，但应采取必要的保护措施避免损坏挠性管。挠性管的安装程序基于安装系统的配置及组件的特性，常见的有S型铺设和J型铺设两种方式。安装挠性管时可以采用进水或非进水方式。制造方和安装承包商应共同确定安装条件。

#### 6.3.2 挖沟和埋设

6.3.2.1 应根据需要对安装后的挠性管进行适当保护。如果已安装的挠性管铺设在较柔软的海床上，需要进行埋设处理。如果挠性管在坚硬的海床条件下进入沟槽或跨越沟槽中的石头，需要采用垫沙袋或类似方法来支撑管道跨越锋利的边角，并且不能使挠性管的最小弯曲半径超出规范的要求，以防造成挠性管外包覆层损伤。

#### 6.3.3 端部配件对接

6.3.3.1 挠性管短段之间连接可以采用焊接和快速连接器。如采用焊接，焊后应进行射线检测和磁粉检测。如采用快速连接器应进行密封检测。

#### 6.3.4 安装监测

6.3.4.1 所有的水下作业均应采用ROV（水下机器人）或潜水员进行连续的监测。被保存的监测记录应可以用来复审水下作业。通过留下的记录应能识别所有可见的标记，能够确认铺设方式、结构形态及机械法兰、连接器、弯曲限制器、弯曲加强器及浮力模块的状态。所有的记录均以日志的形式储存并且具有用于储存和检索的唯一的标识。

#### 6.3.5 安装船舶和设备

6.3.5.1 用于挠性管安装的船舶和设备应处于良好的运转状态，在船舶动员前要对其进行检查。所有的测量设备尤其是载荷测量设备应进行校准。所有的吊装设备应具备合格证书。挠性管安装时应确保管道的铺设张力通过安装设备得到有效控制。

6.3.5.2 通常情况下，挠性管安装期间的船舶布置还应包含如下监测设备：

- (1) 用于水下观测的ROV的配置；
- (2) 满足最大张拉力的张力测量设备；
- (3) 离船角测量设备；
- (4) 履带式张紧器压力载荷测量设备。

#### 6.3.6 安装后调查

6.3.6.1 挠性管铺设完成后应进行后调查工作，确认管道路由、埋深和挠性管处于完好状态。

### 第4节 预调试和调试

#### 6.4.1 一般要求

6.4.1.1 预调试和调试指整个海底管道系统的连接完成后，对挠性管进行的测试和监测。如果在调试期间挠性管发生损坏，应对损坏部位进行修复并重新进行调试。挠性管是否可修复应由挠性管制造方及业主共同商议决定。

6.4.1.2 业主应提供测试标准，制造方在测试方面的建议应予以考虑，测试工作应在管沟回填之前完成测试。

## 6.4.2 通球

6.4.2.1 如果挠性管调试需要进行通球，通球装置的选用应得到挠性管制造方的许可。

6.4.2.2 光滑管不宜使用金属刷。金属刷只能用于粗糙管，且所使用的材料与骨架层需具有兼容性，刷子不能破坏骨架层。光滑管和粗糙管都不宜使用金属刮刀。

6.4.2.3 按照设计要求选用测量装置，使得在测量直径范围内的任何凸起将以永久变形进行标记，测量板宜由挠性管制造方提供，或与挠性管制造方商议，以避免对管道造成损伤。

6.4.2.4 只有在挠性管弯曲半径足够大并容纳下整个通球装置长度的情况下，才宜使用铰接型式通球。对于没有骨架层的挠性管，如可能，宜使用泡沫球。对光滑管而言，当制造方认可时，也可使用其它型式的通球。

## 6.4.3 现场静水压力试验

### 6.4.3.1 一般要求

挠性管可以单独进行试压。如果挠性管是整个管道系统的一部分，也可以参与系统压力测试。在测试过程中，挠性管的所有排气口应在未浸没在海水中的端部配件处打开。

现场静水压试验应参考如下内容：

(1) 如果挠性管在安装过程中未发生任何疑似损坏，那么只需进行以泄漏测试为目的的静水压力试验，试验压力为挠性管设计压力的 1.1 倍。

(2) 如果管道出现损伤、维修、端部装配件更换、回收、未经过工厂接受压力测试的安装或其他同类事件均要进行结构完整性测试，测试压力为设计压力的 1.25 倍。

(3) 除非另有要求，压力的测试持续周期至少为 24 小时。

### 6.4.3.2 仪器仪表的测试

在压力设备及连接处进行压力测试，其压力不低于挠性管额定测试压力的 104%，压力测试持续时间为半小时。

### 6.4.3.3 加压

管道的加压应按照制造方指定的加压速率进行。压力可以提升 to 不大于 110% 的额定测试压力值。加压阶段，光滑管道的空气含量不超过 0.5%，粗糙管道的空气含量不超过 1.0%。如果空气含量超过上述值，则在管道端部进行排气操作，然后继续进行加压操作。

### 6.4.3.4 稳压

稳压应在加压结束后持续 10 小时。在稳压期间，如果由于挠性管的稳定化工艺或者热稳定性导致第一个 10 小时内出现明显的压降，稳压时间将延长。在稳压期间压力曲线和压力日志应进行记录并且海底及测试流体的温度应保持一个稳定值。通常每半小时记录压力读数，每两小时记录温度读数。

### 6.4.3.5 保压时间

稳压结束后，启动 24 小时保压阶段。保压期间的压力应大于或者等于额定试验压力，保压期间的压降不允许超过额定测试压力的 4%。在保压期间应每隔半小时记录一次海底及测试流体的温度。测试期间不允许产生无法解释的压降。试压开始后，一旦管道压力降到允许压力之下，则需要重新加压。在这种情况下，保压周期应重新开始计时。

### 6.4.3.6 卸压

管道卸压应以稳定的可控的速率进行，最大卸压速率应由制造方指定。

### 6.4.3.7 验收合格标准

试验期间，试验压力及时间应满足上述规定，挠性管未发生泄漏，则应认为合格。

### 6.4.3.8 测试设备

用于压力测试的测量设备的校准日期应在近 6 个月内，且设备处于良好的工作状态。测量设备校准应按照以下精确度水平进行：

- (1) 静水压力表：0.0%至 0.5%；
- (2) 静重压力计：0.0%至 0.1%；
- (3) 压力图表记录仪：±0.5%；
- (4) 所有其他测量设备：±1.0%。

### 6.4.3.9 测试记录

压力测试记录：(1) 日期和时间；(2) 位置、条件及情况的详细信息；(3) 试验及安全人员；(4) 填充介质的详细信息；(5) 所有设备及证书的详细信息；(6) 显示连续记录的压

力记录图表；（7）周期性的压力读数，最低要求是每 30 分钟一次；（8）周期性的环境温度读数，最低要求是每 30 分钟一次；（9）周期性的填充介质温度的读数，最低要求是每 30 分钟一次；（10）外观检查。

试验记录应由相关人员签字确认并存档。为验证挠性管道系统的安装符合设计要求，挠性管道系统测试完成后应进行后调查并以影像资料的形式进行记录。

#### 6.4.4 管道干燥

6.4.4.1 如有需要，现场静水压力试验完成后应对挠性管进行干燥除水。

## 第 7 章 在役检验

### 第 1 节 一般要求

7.1.1 对于在役海底挠性管道系统,应根据相应检验种类的规定,申请并经本社检验确认,该系统符合指定的要求,将由本社签发相应的证书。

7.1.2 在役海底挠性管道系统应按照服役情况接受规定的检验:初次检验、年度检验、换证检验和临时检验。各规定检验的适用范围和证书应满足本社《在役海底管道检验指南》(以下简称《在役指南》)第 1 章的对应要求,检验要求应满足《在役指南》第 2 章的适用要求及本章的规定,本指南的附录替代《在役指南》中指向的附录。

7.1.3 对于检验结果应进行适当的评估以确定其是否满足规定要求。对于检验发现超出有关安全技术规范规定的不合格项,以及潜在的不可接受风险与异常现象,应根据本章第 5 节进行评估与处理,并限期整改。在整改完成前,应根据评估结果提出限制使用条件。

### 第 2 节 初次检验

#### 7.2.1 一般要求

7.2.1.1 现用已建成的海底挠性管道系统拟获取本社颁发的《海上设施符合证书》,除应满足《在役指南》的适用要求外,还应满足本节的对应要求。

7.2.1.2 申请人向本社提交要求进行现有挠性管初次检验的申请书中,除《在役指南》的要求之外,还应包括:

- (1) 内部流体成分限制与药剂限制;
- (2) 管中海水存在或含缓蚀剂的海水存在时间限制,以及缓蚀剂要求。

#### 7.2.2 初次检验的内容

7.2.2.1 对于非在本社监督下建造的海底挠性管道系统,初次检验的内容包括:

(1) 资料审查,包括挠性管的特征资料、状态资料(见附录 A)。根据实际情况,经本社同意后,该资料也可适当简化;

(2) 海底挠性管道系统外部检查(见附录 B);

(3) 海底挠性管道系统内部(包括环空)腐蚀与老化监测(见附录 C);

(4) 对海底挠性管的安全保护装置系统进行功能模拟试验或查看记录;

(5) 对于输送油气的水底挠性管,除接受上述规定的检验外,一般于投用后 3 年内进行首次全面检查,全面检查的检验内容参照附录 D,首次全面检查之后的全面检查的周期应参考相关标准与规定确定并经本社确认;

(6) 对于输送油气之外的其他海底挠性管,当服役年限达到设计年限后,若要继续使用,应进行全面检查,检查内容参见附录 D,全面检查的周期应参考相关标准与规定确定并经本社确认。

7.2.2.2 在本社监督下建造的海底挠性管道系统

在本社监督下建造的海底挠性管道系统初次检验的内容基本同 7.2.2.1,但提供的特征资料主要是设计相关资料(附录 A),制造、安装、完工试验等过程的相关文件可不提供。

### 第 3 节 年度检验

#### 7.3.1 一般要求

7.3.1.1 所有海底挠性管应进行年度检验,海底挠性管道系统从获得《海上设施符合证

书》之日起，应每年进行一次定期的年度检验。年度检验除应满足《在役指南》的适用要求外，还应满足本节的对应要求。

7.3.1.2 年度检验的结论应满足《在役指南》的对应要求。

### 7.3.2 年度检验的内容

7.3.2.1 海底挠性管年度检验的主要内容包括：

- (1) 资料审查，主要审查挠性管的状态资料（见附录 A）；
- (2) 根据海底挠性管道系统外部检查计划，核实外部检查执行情况（见附录 B）；
- (3) 海底挠性管道系统内部（环空检测方法可参看 C.2）腐蚀与老化监测（见附录 C）；
- (4) 对海底挠性管的安全保护装置系统进行功能模拟试验或查看记录；
- (5) 对于输送油气的水底挠性管，根据其全面检查计划，核实全面检查执行情况。当发现存在超出有关安全技术规范规定的缺陷，并且不能满足安全使用要求，可要求进行全面检查（全面检查内容见附录 D）；

- (6) 对于输送油气之外的其他水底挠性管，当服役年限达到设计年限后，若要继续使用，应进行全面检查（见附录 D），且根据全面检查结果制定检查计划，核实全面检查执行情况。

## 第4节 换证检验

### 7.4.1 一般要求

7.4.1.1 海底挠性管道系统从获得《海上设施符合证书》起，在证书有效期到期前，应进行一次换发证书的检验，换证检验的要求除满足《在役指南》的适用要求，还应满足本节的对应要求。

7.4.1.2 换证检验的结论应满足《在役指南》的对应要求。

### 7.4.2 换证检验的内容

7.4.2.1 海底挠性管换证检验的主要内容包括：

- (1) 资料审查，主要审查挠性管的状态资料（见附录 A）；
- (2) 根据海底挠性管道系统外部检查计划，核实外部检查执行情况（见附录 B）；
- (3) 海底挠性管道系统内部（环空检测方法可参看 C.2）腐蚀与老化监测（见附录 C）；
- (4) 对海底挠性管的安全保护装置系统进行功能模拟试验或查看记录；
- (5) 对于输送油气的水底挠性管，根据其全面检查计划，核实全面检查执行情况。当发现存在超出有关安全技术规范规定的缺陷，并且不能满足安全使用要求，可要求进行全面检查（见附录 D）。

- (6) 对于输送油气之外的其他水底挠性管，当服役年限达到设计年限后，若要继续使用，则一般应进行全面检查，检验内容参见附录 D，全面检查的周期应参考相关的标准与规定确定，并通过本社确认。

## 第5节 检验结果的处理

### 7.5.1 一般要求

7.5.1.1 检验结果的评估、处理及报告的基本要求和程序应满足《在役指南》的适用内容，缺陷的评价与处理一般应采取作业方管理计划中给出的方法（适用时），或参考本节的推荐做法。

7.5.1.2 对海底挠性管的部分缺陷评估可采取简便方法或详细方法。简便方法指对缺陷进行简单的近似与量化，并使用公式直接计算。详细方法一般是指有限元分析。简便方法通

常比详细方法更加保守。

### 7.5.2 缺陷评估

7.5.2.1 在役海底挠性管可能存在表 7.5.2.1 中的缺陷形式。对于本章第 2 至 4 节规定的监测或检测的缺陷结果，应采用适当的方法进行评价或处理。

可能存在的缺陷形式

表 7.5.2.1

	缺陷形式
骨架层	点蚀、开裂、穿孔或减薄；解锁；压溃或椭圆化；
内压密封层	穿孔与裂纹；破裂；压溃；老化；蠕变；起泡；
抗压铠装层	断裂；解锁；压溃或椭圆化；腐蚀；
抗拉铠装层	断裂；鸟笼效应或聚拢；扭结；
中间包覆层	穿孔与裂纹；破裂；老化；蠕变；
保温层	破碎；浸水；
外包覆层	穿孔、裂纹、撕裂或破裂；
端部配件	端部配件内结构层拔出；排气阀堵塞；排气阀进水；端部配件密封失效；端部配件内结构层裂纹或断裂；端部配件前端与法兰失效；端部配件涂层失效；端部配件外部牺牲阳极破坏；
整体	自由悬跨；隆起屈曲；埋设部分裸露；挠性管过大位移；挠性管过度弯曲或打结；

#### 7.5.2.2 缺陷评价

(1) 骨架层缺陷。骨架层点蚀、开裂、穿孔、减薄、解锁、椭圆度变形等缺陷，可根据具体情况采用适当的方法进行评估和处理。

(2) 内压密封层缺陷。如发生穿孔、裂纹、破裂和压溃，一般对管道进行更换；内压密封层的老化情况可利用计算公式和老化曲线进行分析；内压密封层的蠕变可采用适当的方法进行评估；内压密封层起泡需要由作业方根据实际情况自行或与制造方共同评估。

(3) 抗压/抗拉铠装层的缺陷。根据管道的服役条件，采用适当的方法进行评价。

(4) 中间包覆层缺陷。中间包覆层穿孔与裂纹、破裂、老化和蠕变一般情况下不影响管道的正常使用，对于特别明显的缺陷可咨询制造方。

(5) 外包覆层缺陷。外包覆层出现穿孔、裂纹、撕裂或破裂时，对于双层外包覆层结构一般不影响管道正常使用，对于需要考虑稳性与保温的特殊情况，可使用公式进行简单计算；对于单层外包覆层结构宜采用适当的方法进行评估。

(6) 端部配件部件缺陷。对于端部配件内结构层拔出、端部配件密封失效、内结构层裂纹或断裂、端部配件前端与法兰失效缺陷，一般直接更换端部配件；对于端部配件涂层失效和外部牺牲阳极破坏缺陷，可通过公式进行计算；对于排气阀堵塞和进水一般应评价端部配件排气阀的整体效应，并评估可能引起内压密封层和骨架层压溃的影响。

(7) 自由悬跨、隆起或屈曲、埋设部分裸露和偏离原路由的评估可参考本社《在役指南》的推荐方法。

(8) 过度弯曲或打结需要由作业方根据实际情况或参考制造方要求评估。

## 第8章 回收、再利用及弃置

### 第1节 一般规定

#### 8.1.1 一般要求

8.1.1 挠性管的回收、再利用及弃置一般应满足本章的技术要求，包括推荐的检验方法和试验要求。

8.1.2 挠性管的回收、再利用及弃置还应满足沿岸国和当地政府在环境、通航及海洋功能区划的要求。

### 第2节 回收

#### 8.2.1 一般要求

8.2.1.1 当挠性管的某位置发生失效或损伤需要被回收时，回收的操作程序一般与安装程序相反。为防范挠性管回收过程中的风险，回收之前宜进行下列预调查，以对管道状态进行评估：

(1) 埋设状态。为避免回收作业中挠性管扭结，根据埋设状态采用适当的挖掘方法，推荐采用喷射法；

(2) 管道交叉与邻近管道。防止回收作业中对交叉与邻近管道造成损伤；

(3) 管道的硬质海生物。在挠性管通过托管架、弯曲导向装置以及张紧器等设备时，这些海生物可能损伤外包覆层。

8.2.1.2 宜制定回收程序以保证作业过程中挠性管的完整性。如适用，原始安装分析采用的条件应作为回收作业的条件，如管道是否充水、环境限制条件、设备外部载荷与配重等。

8.2.1.3 回收作业中可能发生的聚合物材料脆化开裂现象宜予以考虑，特别是在相对低温下进行回收时。

8.2.1.4 挠性管的附属设备（如阳极、捆绑装置等）在回收作业时可能因扎带/紧固件的腐蚀/冲蚀产生脱落的现象宜予以考虑。

8.2.1.5 宜防止管内流体溢出导致的污染。对挠性管内潜在的风险源，如放射性物质、汞等，需要进行评估，制定相应的安装规程并准备相应的设备。在挠性管切断与回收作业前可能需要使用含有腐蚀抑制剂的海水对管内进行冲洗与清洁。

8.2.1.6 宜考虑回收过程中存在的风险，特别是人员风险。对所有作业宜进行危害识别与可操作性分析。对可能发生结蜡堵塞的挠性管进行回收作业时，宜考虑安全与环境风险。

8.2.1.7 挠性管的回收作业操作程序中宜明确如何对挠性管进行识别，宜采用适当的视觉识别方法，如 ROV。

8.2.1.8 埋设的挠性管需要特定的操作程序，避免非埋设挠性管使用的拖船设备对其或其他水下设备造成损伤。

8.2.1.9 所有挠性管在安装与操作过程中的限制条件，如最小弯曲半径、最大允许扭矩、最大挤压与拉伸载荷、上盘下盘与储存的推荐做法等，均宜在回收操作程序中说明以避免挠性管失效或损伤。

8.2.1.10 在制定回收标准时，宜考虑挠性管的老化情况（降低的结构能力）。

8.2.1.11 在挠性管回收作业中，由于舷外滑道摩擦力的影响，管道受到的张力大于安装过程中受到的张力，回收前需要根据管道受到的张力和悬空段形状对管道内部进行排空。

8.2.1.12 可使用适当的软件对挠性管回收作业过程进行模拟，仿真模拟需要考虑相关影响因素，如海况、海流剖面、船舶运动及可能存在的限制条件，包括埋设物质（如沙、土壤、石块）、保护垫及结构。

8.2.1.13 挠性管回收作业的全过程中宜实时监测管道的载荷、变形以及磨损情况，并

对管道进行检验,任何损伤都宜在挠性管的外包覆层上用合适的方法进行清晰的标记。宜咨询挠性管制造方对回收管损伤、清洗及储存的验收标准。

### 8.2.2 非粘结挠性管的特殊要求

8.2.2.1 宜对挠性管环空中存在腐蚀性或毒性介质的可能性进行评估。对于所有可能含有以上介质的挠性管端部配件,其排气孔或排气阀在回收作业时宜首先封堵,直至这些危险性介质可以安全的排空。危险性介质的排出可采取从一端注入空气或氮气,另一端排空的方式进行。排气系统宜确保不会导致人员伤害及环境污染。

8.2.2.2 回收作业前在挠性管较低水平位置积聚的气体会在回收作业过程中在环空中传递,导致挠性管接近水面的位置产生较大的压差。回收过程中宜特别考虑因环空内外存在较大压差导致的挠性管外包覆层破裂和其他问题(如张紧器通过外包覆层与内层之间的挤压力产生的摩擦力,无法提供足够的张力)。挠性管回收速度宜受端部配件排气阀的排气速度控制,允许的最大回收速度需要根据排气系统的状态进行计算,使过多的气体压力从排气阀处释放。

8.2.2.3 长时间未使用的排气系统可能会因沉积物、海生物和腐蚀等原因堵塞。宜在回收作业前,在确保安全与可行的前提下将堵塞的排气系统打开。

## 第 3 节 再利用

### 8.3.1 一般要求

8.3.1.1 当挠性管在一个新的环境中重新使用时,一般包含以下阶段:

- (1) 文件准备;
- (2) 管道评估;
- (3) 管道回收;
- (4) 检查与维修;
- (5) 试验要求;
- (6) 安装。

阶段(1)与阶段(2)宜在挠性管回收前进行,以评估其是否有重新使用的可能。阶段(3)宜满足本章第 2 节的要求,阶段(6)宜满足本指南第 6 章的相关要求,其余阶段的要求见本节下面内容。

8.3.1.2 原始设计为静态管的挠性管不推荐作为动态管重新使用。

### 8.3.2 记录文件

8.3.2.1 使用者需要提供一个挠性管之前使用的详细记录以便对挠性管再利用的可行性进行评估。记录中宜至少包括水深、输送流体特性、安装日期、服役周期、操作压力与温度以及可能对挠性管性能产生影响的意外事件。

8.3.2.2 任何会对挠性管造成损伤的事件及之前的维修都宜以文件记录,并保存作为挠性管服役历史的证明。另外,挠性管的所有相关检测和监测记录同样需要存档保留作为评估基础。

### 8.3.3 管道评估

8.3.3.1 挠性管进行再利用评估时,宜依据本指南或公认标准确定新的设计条件,并在评估前明确可能对结果造成影响的原管道历史情况。根据新的应用条件,评估一般分为相似环境应用评估、新环境应用评估和特殊情况应用评估。

8.3.3.2 相似环境应用评估是指新的应用条件和原使用环境类似的挠性管再利用评估,一般包括:

(1) 收集评估信息,包括新的使用环境、剩余寿命、制造方原始数据,及建造时未应用过的附加试验、检测和新的设计分析方法;

(2) 若新的使用环境(包括安装、回收设备与程序、环境条件与运行工况)与原使用环境或设计使用环境相同或更温和,且挠性管的剩余寿命比新的使用环境下的设计寿命更长,则挠性管在获批再利用前仅需检验其损伤情况;

(3) 安装与回收程序以及设备需要重点关注,特别是深水恶劣作业环境下的安装。

8.3.3.3 新环境应用评估是指新应用环境与原使用环境差异较大,或按照 8.3.3.2 进行评估不能得到确定结论的再利用评估,评估内容包括:

(1) 新的整体与截面分析(考虑新的安装设备、操作工况、应用条件等),原型试验结果的可用性(短期或长期);

(2) 挠性管的内压密封层材料对新的输送介质的适用性,包括流体兼容性、温度、气体渗透和老化。在使用老化曲线与模型对老化情况进行分析的过程中需要留出足够的安全裕量;

(3) 如新的使用环境是酸性环境,金属材料宜满足新环境条件下的 SSC 与 HIC 试验要求。各种材料层在以往使用中由于侵蚀与磨损造成的减薄,宜通过适当的方法进行评估。

8.3.3.4 特殊应用评估是指挠性管曾经历异常工况、损伤、临界应力及其他导致剩余寿命显著降低事件后的再利用评估,这种情况下需进行附加分析。该评估的主要内容和要求:

(1) 特定的局部分析,新的原型试验,异常工况记录(如运行工况超过设计条件),服役期间检测或回收后检测中发现的问题记录(损伤、腐蚀、老化等),长期储存记录,材料性能试验(老化试验、兼容性试验、SSC/HIC 试验等);

(2) 特定的局部分析用来评价铠装层断裂、腐蚀以及磨损等造成的损伤。若新的安装设备会对挠性管施加高应力的话,需要进行新的原型试验验证挠性管满足在新环境下再利用的性能要求;

(3) 材料性能试验结果用于评价暴露于输送流体或环境中的材料的剩余寿命。如原数据不适用则需要重新进行试验;

(4) 设计时分析方法可用于局部与整体分析,使用者也可使用自己、制造方或第三方方法,所有方法宜和原设计方法达到同样的功能;

(5) 挠性管的剩余寿命是需要关注的重点,安全裕量宜满足规范的要求。

### 8.3.4 检查与修复

8.3.4.1 检查与修复的人员应具备相关的资质。维修宜咨询制造方。

8.3.4.2 当挠性管的金属材料暴露在空气中易发生快速腐蚀时(如回收过程中),如无法立即进行维修,宜用防腐材料(如胶带、绷带等)立即保护暴露区域,宜确认防腐材料与挠性管的聚合物材料兼容。

8.3.4.3 如外包覆层破损渗水,宜检验已发生腐蚀的区域及因破损后水渗入可能发生腐蚀的完整外包覆层区域。在管道服役过程中排气阀打开的位置是腐蚀高危点。

8.3.4.4 为重新利用,可将挠性管损坏的位置切除,并在剩余段的端面安装端部配件。管体与弯曲加强器/限制器的接触位置宜特别关注,该位置发生腐蚀或损伤的概率较高。

8.3.4.5 外包覆层修复的程序和人员宜获得相应认可。修复程序宜能保障修复后的最低性能要求,修复程序的认可宜包括确认管道性能的试验。作为修复的替代方法,将外包覆层完全剥去并重新挤塑一层新的外包覆层可能更加方便。

8.3.4.6 宜对端部配件进行详细检查。宜评估所有附件(端部配件外套、螺栓、螺母)防腐系统的完整性。垫圈座宜满足设计标准的表面加工要求。在法兰面不满足设计要求的情况下,需判断机械再加工是否可行,法兰是否更换。若端部配件无法重新焊接上新法兰的话,更换法兰可能需要同时更换整个端部配件。建议对排气阀进行测试、重新校准或更换。

8.3.4.7 宜评估端部配件高分子材料部件的长期性能降低情况。树脂和垫圈的服役寿命宜按照制造方要求。

8.3.4.8 新端部配件安装的操作人员与操作程序宜获得相应认可。

8.3.4.9 推荐使用内窥检测方式检查骨架层是否发生异常。

### 8.3.5 试验要求

8.3.5.1 当挠性管准备再利用时,宜按照工厂接受试验(FAT)要求或使用者需求(如

静水压、测径与电阻测试等)进行试验。静水压试验的测试压力建议遵照 FAT 试验的要求。如试验压力降低,则设计压力宜降低为 0.67 倍的试验压力。

8.3.5.2 压力试验后管道进行保存,宜清洗并做防腐处理。

## 第 4 节 弃置

### 8.4.1 一般要求

8.4.1.1 挠性管的弃置主要包括临时性弃置与永久性弃置。临时性弃置是指管道在某阶段废弃,但在将来一定时间内该管道要重新启用。永久性弃置是指管道废弃后不再启用。

挠性管的临时性弃置后的再启用,需要按照本章第三节对其进行评估。

8.4.1.2 挠性管的弃置方案一般分为原位弃置、全线拆除弃置和局部拆除原位弃置三种,弃置方案应满足沿岸国的要求。

### 8.4.2 原位弃置

8.4.2.1 挠性管的原位弃置是指对挠性管进行一系列的处理,使之满足沿岸国相关法律法规要求,弃置原位不再使用。

8.4.2.2 弃置主要流程一般包括:挠性管停输、清理、挠性管的切割与封堵、挠性管的原位掩埋处理。

### 8.4.3 全线拆除弃置

8.4.3.1 挠性管的全线拆除弃置是指对全部管道进行拆除。

8.4.3.2 弃置主要流程一般包括:挠性管停输、清理、挠性管切割、挠性管回收。

### 8.4.4 局部拆除原位弃置

8.4.4.1 局部拆除原位弃置指拆除部分挠性管,部分原位弃置。主要用于在废弃管道可能穿越了海事部门规划的海域,如航道、经济作业区等,管道所有者为了在经济许可的情况下满足海事部门规划的要求,通常采用规划区域中的海管全部拆除,其他区域的海管采取原位弃置的方式。

8.4.4.2 弃置主要流程一般包括:挠性管停输、清理、挠性管回收段切割回收、挠性管端口封堵掩埋。

## 附录 A 图纸资料

### A.1 特征资料

#### A.1.1 设计图纸审查

挠性管的设计图纸审查，一般包括以下图纸资料：

- (1) 设计规格书，包含项目概述、功能要求、流体要求、外部环境参数、总体系统要求和业主的特定要求等；
- (2) 材料规格书，包含管体各层和端部配件材料的性能参数等；
- (3) 管体图纸，包含管体断面图，骨架层、铠装层截面图，各层结构参数；
- (4) 端部配件图纸；
- (5) 牺牲阳极图纸；
- (6) 材料选择报告，包含管体各层和端部配件材料；
- (7) 管体设计报告，包含管体的截面性能参数，各载荷工况下的强度分析；
- (8) 管体寿命分析报告，对管体各层进行寿命分析，保证其满足设计寿命；
- (9) 端部配件设计报告，包含端部配件的各部件强度校核和整体强度校核；
- (10) 稳定性分析报告，针对管道安装期和运行期的稳定性分析；
- (11) 阴极保护系统分析报告，针对管道参数和端部配件等进行阳极计算，确定阳极形式及数量；
- (12) 以下适用的图纸资料：排气阀设计图、管道路由图、近平台（近岸）布置图、交叉点布置图、水泥压块布置图、弯曲加强器/限制器图纸、快速连接器图纸、保温设计报告、隆起屈曲分析报告、安装分析报告、跨越分析报告、悬跨分析报告、意外载荷计算报告、制造误差分析报告、弯曲加强器/限制器设计报告、快速连接器设计报告等；
- (13) 本社要求的其他图纸资料。

#### A.1.2 制造检验

- (1) 挠性管材料资质档案，包括管体金属层材料试验程序与试验报告、管体非金属材料试验程序与试验报告、端部配件金属材料试验程序与试验报告、端部配件非金属材料试验程序与试验报告、挠性管附件材料试验程序与试验报告；
- (2) 原型试验的程序及试验报告；
- (3) 材料入厂检验报告；
- (4) 各结构层生产工艺规程与评定报告；
- (5) 金属层材料焊接工艺规程、无损探伤检验规程、焊缝防腐处理操作规程；
- (6) 非金属材料修补工艺规程；
- (7) 端部配件装配程序；
- (8) 牺牲阳极的材料与制造技术要求；
- (9) 端部配件防腐涂层技术要求与涂覆规程；
- (10) 焊接和无损探伤检验人员的资格证书；
- (11) 工厂接受试验的程序及试验报告。

#### A.1.3 安装检验

- (1) 挠性管运输规程；
- (2) 铺管程序及图纸；
- (3) 挠性管端部配件焊接工艺规程认可试验报告及无损检验技术规程；
- (4) 牺牲阳极安装程序；
- (5) 管道交叉、跨越点处理规程；
- (6) 水泥压块布置规程；
- (7) 气囊安装规程（如适用）；

- (8) 海底挠性管与立管连接方法和工艺规程说明；
- (9) 接岸段铺设程序；
- (10) 铺设、安装作业船舶及设备说明；
- (11) 从事海上安装的焊接和无损探伤检验人员资格证书。

#### A.1.4 完工试验

- (1) 无损探伤检验报告；
- (2) 有关挖沟、埋设和防护工程的报告（如适用）；
- (3) 有关防腐系统性能报告；
- (4) 清管与水压试验报告；
- (5) 后调查报告。

## A.2 状态资料

### A.2.1 安全管理资料

安全管理资料包括安全生产许可证、安全管理规章制度与安全操作规则。

### A.2.2 运行状况资料

运行状况资料包括日常运行监控和维护记录、隐患排查治理记录、改造与维修资料、故障与事故记录。

海底挠性管运行监控记录，包括输送介质分析报告（硫化氢、二氧化碳、氯离子和游离水等），工艺参数（如输送介质压力、温度、流量）记录、环空工艺参数（温度、压力）记录、环空介质分析报告（硫化氢、二氧化碳等）（适用时）、药剂添加记录、清管记录、压力异常波动记录、外部或内部腐蚀监控记录、阳极电位记录、阴极保护系统故障记录、海流和海底挠性管振动记录（适用时）、海底挠性管修理或者改造的资料、海底挠性管事故或者失效资料、海底挠性管的各类保护措施的使用记录等。

## A.3 检测机构及人员资质

### A.3.1 检测机构及人员应至少符合下列要求

(1) 检测机构应满足主管部门和行业的相关要求，拥有满足检测要求的检测设备，并具有检测技术力量和质量控制体系；

(2) 检测操作人员，数据收集、处理、分析和报告的人员，应具有业内认可的专业能力。

## 附录 B 外部检查

### B.1 一般要求

B.1.1 新建海底挠性管，一般应于投用后 1 年内进行首次外部检查；

B.1.2 海底挠性管在进行外部检查后，应根据外部检查的结果制定下次外部检查计划，外部检查的各类检测项目周期一般不宜超过 2 年；

B.1.3 海底挠性管建造完工后的调查报告和检测资料，可以作为首次外部检查内容的补充；

B.1.4 对于存在影响海底挠性管安全的因素，如挠性管类型不同、路由地质条件复杂、环境影响恶劣、出现挠性管悬跨、支撑件脱落、阳极消耗异常等情况时，应根据实际检查结果及其评估报告，缩短海底挠性管外部检查周期。

### B.2 挠性管的外部检查

B.2.1 挠性管的外部检查应确保满足设计要求且不会发生损坏，检查的内容至少包括：

- (1) 挠性管位置、走向、埋设深度或暴露状况；
- (2) 自由悬跨，包括长度、高度及端部支撑状况；
- (3) 为减小自由悬跨而安装的支撑状况；
- (4) 挠性管隆起与屈曲，包括长度、位移；
- (5) 为减小隆起的影响安装的支撑状况；
- (6) 挠性管的局部过度弯曲情况；
- (7) 外包覆层破损情况；
- (8) 外包覆层鼓包；
- (9) 端部配件及其附属部件结构损伤情况；
- (10) 端部配件涂层和阳极的机械损伤；
- (11) 阳极的消耗情况与电联通情况；
- (12) 排气阀机械损伤；
- (13) 影响海底挠性管完整性或影响附属结构的局部海床冲刷；
- (14) 影响海底挠性管完整性的沙波运动；
- (15) 挠性管保护物的完整性；
- (16) 大量处于或靠近海底挠性管的瓦砾堆；
- (17) 与其他挠性管、海缆的交叉状况；
- (18) 弯曲限幅器的机械损伤；
- (19) 端部配件法兰快速连接器的机械损伤。

## 附录 C 内部腐蚀与老化监测

### C.1 一般要求

C.1.1 海底挠性管作业者应根据挠性管日常运行和维护情况进行内部腐蚀与老化监测和检查工作，验船师应检查对应的内部腐蚀与老化监测和检查记录。

(1) 流体分析，即监测流体的物性参数和采样液腐蚀性与其兼容性成分的化学分析，流体添加剂（化学药剂）的使用记录；

(2) 腐蚀与老化探测，如：腐蚀挂片、老化挂片或其他可回收探针对挠性管接触管内腔体与环空的材料的腐蚀与老化速率进行定期或在线检测；

(3) 壁厚测量，对端部配件前端的壁厚进行测量。

C.1.2 如进行环空域腐蚀检测，可参照 C.2 要求。

### C.2 环空监测方法

C.2.1 环空监测可以通过安装在挠性管上游的挠性管测试短节进行，挠性管测试短节可以采用串联或并联两种方式安装在挠性管上游，如下图。

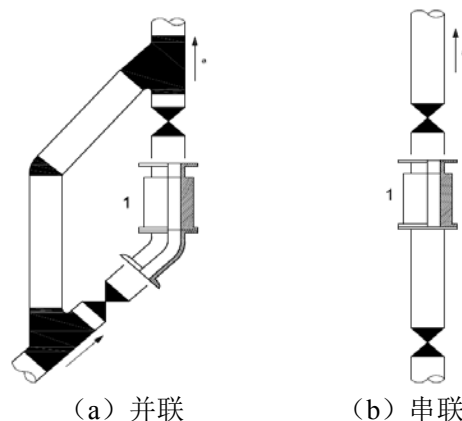


图 C.2.1 挠性管测试短节安装示意图

C.2.2 环空监测应满足设计要求，检查的内容应至少包括：

(1) 环空温度监测，即通过温度传感器对环空温度进行实时监控。

(2) 介质分析，即对环空的介质成分进行取样分析，包括但不限于二氧化碳浓度、硫化物浓度以及液相中铁离子浓度等。

(3) 挂片检测，利用腐蚀与老化挂片，腐蚀探针或 LPR（线性极化电阻技术）等手段对环空金属铠装层的腐蚀与内压密封层的老化情况进行检测。

## 附录 D 全面检查

### D.1 一般要求

D.1.1 全面检查，是指按一定的检查周期对在役海底挠性管进行基于风险的检测。

D.1.2 属于下列情况之一的油气挠性管，如风险超出可接受程度，应当进行全面检查和合于使用评价：

- (1) 运行工况发生显著改变从而导致运行风险提高的；
- (2) 输送介质种类发生重大变化，改变为更危险介质的；
- (3) 添加未经历内压密封层兼容性评估的药剂的；
- (4) 年度检验结论要求进行全面检查的；
- (5) 所在地发生地震、滑坡等重大地质灾害的；
- (6) 有重大改造维修的；
- (7) 停用超过 1 年后再启动的；
- (8) 出现新增重大风险源的。

D.1.3 对于输送油气之外的其他海底挠性管，当服役年限达到设计年限后，若要继续使用，应进行全面检查。

D.1.4 属于下列情况之一的挠性管，应适当缩短全面检查周期：

- (1) 位于事故后果严重区内；
- (2) 1 年内多次发生泄漏事故及受自然灾害、第三方破坏严重的；
- (3) 外包覆层或保温层破坏严重或者无有效阴极保护的；
- (4) 风险评估发现风险值较高的；
- (5) 检查中发现除前几项以外的严重问题；
- (6) 验船师和作业者认为应当缩短全面检查周期的。

D.1.5 全面检查的方案和合于使用评价的内容需报本社供审查。

### D.2 全面检查的方法

检测单位应当根据风险评估确定的结果，选择合适的全面检查方法。推荐的全面检查方法有内检测、耐压（压力）试验和直接评价。检测单位可以采用上述任一或任何组合方式对海底挠性管进行检测。

#### D.2.1 内检测

对具备内检测条件的海底挠性管，可采用挠性管内检测器对挠性管内部骨架层与内压密封层损伤、变形以及铠装层的断裂情况进行检测。

#### D.2.2 耐压（压力）试验

对不具备内检测条件的海底挠性管，可以采用耐压（压力）试验的方法进行全面检查。耐压（压力）试验按照相应国家标准、行业标准及挠性管设计标准的规定。推荐的试验压力一般是：

- (1) 铺设完工或维修后的测漏打压，试验压力为设计压力的1.1倍；
- (2) 结构完整性打压，试验压力为设计压力的1.25倍；
- (3) 挠性管接近使用寿命，需要延寿打压，试验压力为操作压力的1.25倍。

### D.2.3 直接评价

D.2.3.1 若有资料证明,某些海底挠性管不具备采用内检测、耐压试验等方法时,可接受直接评价的方法进行全面检查。

D.2.3.2 下列情况下,原则上不应采用直接评价方法进行全面检查:

- (1) 新建的油气海底挠性管;
- (2) 富含CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S等介质且可能成为主要失效原因的海底挠性管。

D.2.3.3 直接评价应选用成熟可靠的方法,满足相关国际或行业标准的要求,且需报本社审查。

D.2.3.4 直接评价的内容至少包括:评价腐蚀与老化速度、判定腐蚀位置、评价腐蚀与老化控制措施、制定腐蚀与老化监管措施以及再次评价计划。

## D.3 合于使用评价

### D.3.1 合于使用评价

D.3.1.1 海底挠性管全面检查后,应进行合于使用评价。合于使用评价包括对海底挠性管进行的应力计算;对危害海底挠性管结构完整性的缺陷进行剩余强度评估与超标缺陷安全评定;对危害海底挠性管安全的主要潜在危险因素进行挠性管剩余寿命预测、以及在一定条件下开展材料适用性评价。

D.3.1.2 全面检查和合于使用评价,应当采用完整性管理理念中的检验检测评价技术,开展基于风险的检测,并且确定挠性管的事故后果严重区。

D.3.1.3 评价单位应当结合海底挠性管全面检查情况进行合于使用评价,并且确定挠性管许用参数和下次全面检查日期。

D.3.1.4 有下列情况之一的挠性管,应当按照许用压力/应变进行强度校核:

- (1) 金属材料减薄量超过设计腐蚀裕量;
- (2) 高分子材料老化速度高于设计允许值;
- (3) 操作参数发生增大的;
- (4) 输送介质种类发生重大变化,改变为更危险介质的;
- (5) 存在较大变形、挠曲、破坏,以及支撑件损坏等现象且无法复原的;
- (6) 法兰经常性泄漏、破坏的;
- (7) 评价人员或者作业者认为有必要的。

D.3.1.5 对全面检查中发现的危害海底挠性管结构完整性的缺陷进行剩余强度评估与超标缺陷安全评定,在剩余强度评估与超标缺陷安全评定过程中应当考虑缺陷发展的影响,并且根据剩余强度评估与超标缺陷安全评定的结果提出运行维护意见。

D.3.1.6 根据危害海底挠性管安全的主要潜在危险因素选择海底挠性管剩余寿命预测方法,包括腐蚀寿命、裂纹扩展寿命、损伤寿命等。

D.3.1.7 有下列情形之一的挠性管,应当进行材料适用性评价:

- (1) 材质发生劣化的;
- (2) 输送介质种类发生重大变化,改变为更危险介质的;
- (3) 添加未经过内压密封层兼容性评估的药剂的。

### D.3.2 全面检查、合于使用评价报告与问题处理

D.3.2.1 检测人员应当根据全面检查情况和所进行的全面检查项目,准确填写全面检查记录,及时出具全面检查报告。合于使用评价工作结束后,评价人员应当根据全面检查报告和所进行的合于使用评价项目,出具合于使用评价报告。合于使用评价报告中应当明确许用

参数、下次全面检查日期等。

D.3.2.2 作业者应当对合于使用评价过程中要求进行处理的缺陷进行修复或者采取降压运行的措施。评价单位可以在出具报告前将需要处理的缺陷书面通知作业者。作业者处理完成并经过评价单位确认后，评价单位再正式出具合于使用评价报告。

D.3.2.3 缺陷修复前，作业者应当制定修复方案，缺陷的修复应当按照有关要求，相关文件记录应当存档。

D.3.2.4 作业者对挠性管采取相应的修复或采取降压措施，并且经评价单位确认后，评价单位应当重新对风险预评估结果进行修正（即风险再评估）。风险评估的结果应当纳入挠性管使用管理工作中。

D.3.2.5 作业者应当将全面检查与合于使用评估结果存档，有条件的应当将全面检查与合于使用评估结果录入海底挠性管管理系统，用信息化技术进行管理。

D.3.2.6 以上D.3.2.1至D.3.2.4的工作内容应报本社审查认可，验船师应当及时将全面检查、合于使用评价结果输入相关发证系统。