



指导性文件
GD07-2007

中 国 船 级 社

海底管道结构分析指南

2006



人民交通出版社
China Communications Press



指导性文件
GD07-2007

中 国 船 级 社

海底管道结构分析指南

2006

人民交通出版社

书 名：海底管道结构分析指南

著 作 者：中国船级社

责任编辑：董 方

出版发行：人民交通出版社

地 址：(100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址：<http://www.chinasybook.com> (中国水运图书网)

销售电话：(010) 64981400, 64960094

总 经 销：北京中交盛世书刊有限公司

经 销：人民交通出版社交实书店

印 刷：北京鑫正大印刷有限公司

开 本：787×1092 1/16

印 张：3.75

字 数：76 千

版 次：2007 年 7 月第 1 版

印 次：2007 年 7 月第 1 次印刷

统一书号：15114·1057

印 数：0001~1000 册

定 价：25.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

目 录

第1章 总则	1
1.1 目的	1
1.2 适用范围	1
1.3 术语及定义	1
1.4 设计方式和原理	4
第2章 环境条件	8
2.1 通则	8
2.2 环境参数	8
第3章 载荷	11
3.1 通则	11
3.2 载荷效应系数与载荷组合	11
3.3 功能载荷	12
3.4 环境载荷	12
3.5 建造载荷	15
3.6 偶然载荷	15
3.7 其他载荷	15
第4章 管道的在位结构强度分析	17
4.1 通则	17
4.2 极限状态下的失效模式和控制条件	17
4.3 强度分析流程	18
4.4 承压（破裂）控制	18
4.5 屈曲	21
4.6 椭圆化	26
4.7 棘齿效应	26
4.8 累积塑性应变	26
4.9 断裂	28
4.10 疲劳	28

4.11 偶然极限状态	30
第5章 铺管作业管道强度分析	31
5.1 通则	31
5.2 铺管强度分析流程和校核准则	31
5.3 不同铺管方式下的强度计算特点	31
第6章 悬跨管道强度分析	33
6.1 通则	33
6.2 筛分疲劳分析	33
6.3 完全疲劳分析	35
6.4 极限状态（ULS）分析	37
6.5 安全系数	39
第7章 海床上的稳定性分析	40
7.1 通则	40
7.2 稳定性校核准则	40
7.3 沉降和上浮	41
7.4 稳定性分析方法	41
第8章 腐蚀管道的强度评估	44
8.1 通则	44
8.2 评估流程	44
8.3 分项安全系数	45
8.4 单个腐蚀缺陷的评估	48
8.5 相互作用腐蚀缺陷的评估	50
8.6 复杂形状腐蚀缺陷的评估	53

第1章 总 则

1.1 目的

本指南涵盖了海底管道的铺管分析以及运行状态分析，其中运行状态分析包括在位应力计算及屈曲强度计算、悬跨分析、海床上的稳定性分析以及腐蚀管道强度分析等内容。因此本指南主要是针对海底管道结构方面的计算分析，为海底管道的检验和审图给出一个指导性的文件，并为在役海底管道的状态评定提供可借鉴的程序和步骤。

1.2 适用范围

本指南适用于刚性金属海底管道，不适用于可挠性软管和立管。

1.3 术语及定义

(1) 整体屈曲 (Buckling, global)

指屈曲模式涉及到管道的连续长度，而不是横截面的总变形。

(2) 局部屈曲 (Buckling, local)

指屈曲模式限制在一小段长度，局部屈曲将引起横截面的变形。

(3) 特征载荷 (Characteristic load)

用于确定载荷影响的载荷参考值。特征载荷一般是根据载荷分布函数上端定义的一个分位点确定的。

(4) 特征抗力 (Characteristic resistance)

用于确定设计强度的结构强度参考值。特征抗力一般是根据抗力分布函数下端定义的一个分位点确定的。

(5) 特征强度 (Characteristic strength)

用于确定设计强度的名义值。特征强度一般是根据强度分布函数下端定义的一个分位点而确定的。

(6) 条件载荷效应系数 (Condition load effect factor)

对特定载荷条件进行屈曲计算的载荷影响系数。

(7) 腐蚀裕量 (Corrosion allowance)

在设计阶段为补偿在操作过程中由于腐蚀而使管壁（内、外）变薄而增加的管壁厚度。

(8) 设计寿命 (Design life)

设备或系统从最初安装或使用到永久性停产的时间周期。原设计寿命可经重新评估后予以延长。

(9) 最高设计温度 (Design temperature ,maximum)

设备或系统在安装和运行期间可经受的最高可能温度,要考虑环境和运行温度。

(10) 最低设计温度 (Design temperature ,minimum)

设备和系统在安装和运行期间(不管是否承压)可经受的最低可能温度,应考虑环境和运行温度。

(11) 制造系数 (Fabrication factor)

用于补偿管子制作过程中冷成型造成的材料强度降低的材料强度系数。

(12) 失效 (Failure)

对部件或系统造成以下其中之一或者兼而有之影响的事件:

——部件或系统功能损失;

——功能降低到设施、人员或环境的安全性显著减小的程度。

(13) 疲劳 (Fatigue)

循环载荷引起的材料损伤。

(14) 静水压力试验 (Hydro-test or Hydrostatic test)

在钢管厂进行的静水压强度试验。

(15) 极限状态 (Limit state)

超出这个状态结构物就不再满足要求。对海底管道有以下相关极限状态:

SLS——操作极限状态;

ULS——极端极限状态;

FLS——疲劳极限状态;

ALS——偶然极限状态。

(16) 载荷 (Load)

在设备或系统中引起应力、应变、变形、位移、运动等的任何作用。

(17) 载荷组合 (Load combination)

对 a 、 b 两种载荷组合,应对组合的载荷进行局部屈曲极限状态准则检查。载荷组合 a 是一个系统检查,且只有当系统效应存在时才应适用。

(18) 载荷效应 (Load effect)

单一载荷或载荷组合对设备或系统引起的诸如应力、应变、变形、位移、运动等效应。

(19) 载荷效应系数 (Load effect factor)

分项安全系数,特征载荷乘以该系数后得到设计载荷效应。

(20) 材料抗力系数 (Material resistance factor)

分项安全系数,使特征抗力减小到更低分位点。

(21) 材料强度系数 (Material strength factor)

用于确定材料特征强度的系数,反映屈服应力的可信度。

(22) 名义外径 (Nominal outside diameter)

规定的管子外径,即应是真实外径。

(23) 名义管壁厚 (Nominal pipe wall thickness)

规定的管子无腐蚀壁厚, 它等于最小的壁厚加上制造公差。

(24) 不圆度 (Out of roundness)

钢管圆周与圆的偏差。可用椭圆度 (%) 或局部不圆度, 即扁率 (mm) 表示。

(25) 椭圆化 (Ovalisation)

圆周与圆的偏差。截面为椭圆形。

(26) 分项安全系数 (Partial safety factor)

用该系数对变量的特征值加以修正给出设计值 (如载荷效应、条件载荷效应、材料抗力或安全等级抗力等)。

(27) 压溃压力 (Pressure, Collapse)

抵抗外部过压的特征抗力。

(28) 设计压力 (Pressure, Design)

对于管道而言, 这是正常运行期间最大的内压, 该压力要指明在设计管道或管道段的哪一高度上。设计压力必须考虑所有流量范围内的稳流状态以及在使用恒定设计压力的管道或管段上可能的堵塞和关闭条件。

(29) 偶然压力 (Pressure, Incidental)

对于管道而言, 指在任何偶然运行状况, 并参照与设计压力相同的参考高度, 管道或管道段被设计可以承受的最大内压。

(30) 起始压力 (Pressure, Initiation)

使已有的局部屈曲或凹陷开始产生扩展屈曲所需的外部过压。

(31) 局部压力 (Local pressure; Local design pressure or Local incidental pressure)

局部压力、局部设计压力或局部偶然压力: 对于管道而言, 在管道系统或管道段任何一点与设计压力或偶然压力相对应的内压。它等于参考点的压力加上参考点与所考虑点的高度差引起的输送介质的静压水头。

(32) 最大允许偶然压力 (Pressure, Maximum allowable incidental, MAIP)

对于管道而言, 它是指管道系统在偶然 (瞬时) 运行期间的最大压力, 最大允许偶然压力定义为最大的偶然压力减去压力安全系统的正误差。

(33) 最大允许操作压力 (Pressure, Maximum allowable operating, MAOP)

对于管道而言, 这是管道系统在正常运行时的最大压力。最大允许操作压力定义为设计压力减去压力调节系统的正误差。

(34) 扩展压力 (Pressure, Propagating)

对扩展屈曲, 要继续扩展所需的最小压力。

(35) 棘齿变形 (Ratcheting)

在循环载荷下的累积变形, 特别是直径增加。

(36) 抗力 (Resistance)

结构或结构的部分抵抗载荷效应的能力。

(37) 安全等级 (Safety class)

对于管道而言，根据失效后果划分管道系统的重要性所采用的概念。

（38）安全等级抗力系数（Safety class resistance factor）

是把较低分位点抗力转换到设计抗力，反映安全等级的分项安全系数。

（39）规定的最小拉伸强度（Specified minimum tensile strength, SMTS）：

材料采办期间按规格书或标准规定的最小拉伸强度。

（40）规定的最小屈服应力（Specified minimum yield stress, SMYS）

材料采办期间按规格书或标准规定的最小屈服应力。

（41）极限拉伸强度（Ultimate tensile strength, UTS）

实测的最终拉伸强度。

（42）屈服应力（Yield stress）

实测的拉伸屈服应力。

1.4 设计方式和原理

本指南涉及到的计算方法是建立在极限状态和分项安全系数基础上，即载荷抗力系数法（LRFD）。对基于工作应力法（WSD）所设计管道的结构分析，可参照我社《海底管道系统规范》进行。

1.4.1 流体分类

管道系统输送的流体应根据它们潜在的危害性来进行分类，分类如表1.4.1所示。对于表中没有具体说明的气体或液体，要按照具有相似的潜在危害的物质分类，如果分类不明确，则定为最高危害性的。

流 体 分 类

表1.4.1

类 别	描 述
A	典型的非可燃水基流体
B	易燃的和/或有毒的物质，该物质在常温常压下是液体,典型的例子是石油产品。甲醇也是一种易燃的和有毒的液体
C	非可燃物质，该物质在常温常压下是无毒气体，典型的例子是氮气、二氧化碳、氢气和空气
D	无毒的，单相的天然气
E	易燃的和/或有毒的液体，在常温常压下是气体，被作为气体和/或液体输送。典型的例子是氢气、天然气（不属于D类的）、乙烷、乙烯、液化石油气（如丙烷、丁烷）、天然气液体、氨和氯

1.4.2 位置分区

管道系统应按如下原则定义分区：

- 1区，沿着管道没有经常性人类活动的区域；
- 2区，经常有人类活动的区域或平台附近区域。

2区的范围要根据适当的风险分析确定。如果没有进行这样的分析，要采用至少500m的距离。

1.4.3 安全等级划分

管道设计应基于潜在的失效后果，这集中体现在安全等级的划分中。安全等级可因阶段、位置以及流体类别的不同而不同，分为如下三级：

(1) 低安全级

失效对人类伤害风险低，对经济和环境后果小，通常是管道安装阶段的级别。

(2) 一般安全级

对于临时条件，失效对人类有伤害风险，对环境污染显著，有非常大的经济和政治影响，通常这是在平台外部区域进行操作的级别。

(3) 高安全级

对于操作条件，失效对人类伤害风险高，对环境污染显著，有非常大的经济和政治影响，这通常是在2区进行操作的级别。

通常情况下，管道所应用的安全等级如表1.4.3所列。

安全等级的一般划分				表1.4.3
阶 段	流体类别A、C		流体类别B、D 和E	
	位置分区		位置分区	
	1	2	1	2
临 时 ^{①②}	低	低	低	低
操 作	低	一般 ^③	一般	高

注：① 试投产前的安装阶段（即临时阶段）一般为低安全级别。

② 对于试运行后的临时阶段，其安全等级的确定应基于对失效后果的具体考虑。

③ 正常操作情况下的立管为高的安全等级。

1.4.4 分项安全系数设计方法

1.4.4.1 分项安全系数设计方法的基本原理是：对任何可能的失效模式，系数化的设计载荷不超过系数化的设计抗力。其中，系数化的设计载荷是通过特征载荷乘以载荷效应系数获得，系数化的抗力是通过特征抗力除以抗力系数获得。

1.4.4.2 如果设计载荷（ L_d ）不超过设计抗力（ R_d ），则认为满足规定的安全水平，即：

$$L_d (L_F, L_E, L_A, \gamma_F, \gamma_E, \gamma_A, \gamma_C) \leq R_d (R_K (f_K), \gamma_{SC}, \gamma_m) \quad (1-1)$$

式中： L_F, L_E, L_A ——分别为功能载荷、环境载荷以及偶然载荷的特征载荷效应；

$\gamma_F, \gamma_A, \gamma_C$ ——分别为功能载荷效应系数、偶然载荷效应系数以及条件载荷效应系数；

R_K ——特征抗力效应；

f_K ——特征材料强度；

γ_{SC}, γ_m ——分别为安全等级抗力系数和材料抗力系数。

1.4.4.3 设计载荷效应是基于或由适用的特定条件载荷效应系数 γ_C 调整的系数化载荷效应的函数。对于特定的失效模式，系数化载荷效应应按极限状态函数组合。

1.4.4.4 与极限状态有关的载荷效应系数、安全等级抗力系数和材料抗力系数都需要用可靠度方法对不同的安全级别进行校准。

1.4.4.5 载荷效应和抗力的特征值是以各自的概率分布函数的分位点给出的。它们应基于可靠的数据，并采用公认的统计方法得到。

1.4.5 极限状态与抗力系数

1.4.5.1 极限状态

依据极限状态描述的所有相关失效模式在设计时必须考虑。极限状态分为以下四种类型：

- (1) 操作极限状态 (SLS)：如果超过这种状态，管道不再适于正常运行。
- (2) 极端极限状态 (ULS)：如果超过这种状态，管道的完整性将遭到破坏。
- (3) 疲劳极限状态 (FLS)：考虑累积循环载荷效应的极端极限状态。
- (4) 偶然极限状态 (ALS)：由偶然载荷导致的极端极限状态。

1.4.5.2 极限状态形式

如果设计载荷 (L_d) 不超过设计抗力 (R_d)，则认为满足安全要求，如式 (1-1) 所示。其中设计载荷可以以下面的形式表示：

$$L_d = L_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + L_E \cdot \gamma_E + L_A \cdot \gamma_A \cdot \gamma_C \quad (1-2)$$

具体形式有如下的几种：

$$\begin{aligned} M_d &= M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + M_E \cdot \gamma_E + M_A \cdot \gamma_A \cdot \gamma_C \\ \varepsilon_d &= \varepsilon_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + \varepsilon_E \cdot \gamma_E + \varepsilon_A \cdot \gamma_A \cdot \gamma_C \\ S_d &= S_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + S_E \cdot \gamma_E + S_A \cdot \gamma_A \cdot \gamma_C \\ \Delta p_d &= \gamma_p \cdot (p_{ld} - p_e) \end{aligned} \quad (1-3)$$

其中 $M_d, \varepsilon_d, S_d, \Delta p_d$ 分别代表设计弯矩、设计压应变、设计有效轴力和设计压差， p_{ld}, p_e 分别为局部设计压力和外压。载荷效应系数 $\gamma_F, \gamma_E, \gamma_A, \gamma_p, \gamma_C$ 的取值见表 3.2 (1) 和表 3.2 (2)，这些系数适用于所有的安全等级。设计抗力 R_d ，一般可以表示为如下形式：

$$R_d = \frac{R_k(f_k)}{\gamma_{sc} \cdot \gamma_m} \quad (1-4)$$

其中 f_k 为特征材料强度。材料抗力系数 γ_m 是由极限状态的种类决定的，在下表中给出：

材料抗力系数 γ_m		表1.4.5.2 (1)
极限状态种类	SLS/ULS/ALS	FLS
γ_m	1.15	1.00

安全等级抗力系数 γ_{sc} 则与安全等级有关，见下表：

安全等级抗力系数 γ_{sc}		表1.4.5.2 (2)	
	γ_{sc}		
安全等级	低	一般	高
压力控制 ^②	1.046 ^{③④}	1.138	1.308 ^①
其他	1.04	1.14	1.26

注：① 对1区管道，一般安全等级抗力系数可取1.138。

② 给出三位有效数字是为了与ISO使用系数一致。

③ 低安全等级由要求比偶然压力高3%的系统压力试验来控制。因此，对于在低安全等级的运行，抗力系数将会有效提高3%。

④ 对于系统压力试验，材料强度系数应取1.00，因此所有材料的允许环向应力为SMYS的96%。

1.4.6 可靠度分析

在某些情况下，可以用公认的结构可靠度分析方法来代替本指南所用到的LRFD法。此时，管道的目标可靠度要与根据本指南进行分析所得到的相似管道的安全水平进行对比和校准，或者根据表1.4.6给出的失效类别和安全等级来确定相应的目标安全水平。

可接受的失效概率与安全等级的关系			表1. 4. 6
极限状态	目标年度失效概率		
	低安全级	一般安全级	高安全级
SLS	10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}
ULS	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
FLS			
ALS			

第2章 环境条件

2.1 通则

2.1.1 海底管道结构分析时应考虑与特定位置和操作有关的各种环境条件的影响，主要包括：潮、波浪、海流、地震、海生物、温度、土壤条件、海冰等。

2.1.2 环境数据要能够代表管道所在的地理区域。如果管道所在区域缺乏足够的数据，可以由相关区域的数值进行合理保守地估计来获得。

2.1.3 对于沿管道路由进行的环境条件评价，可以将管道分成几段，每一区段的特征可以由给定的水深、海底地形以及其他影响环境条件的参数来描述。

2.1.4 各种环境数据要用根据统计数据或长期观察的特征值来描述。

2.1.5 在描述具有随机性质的环境参数时要利用统计数据，利用公认的统计方法得到相关参数。

2.2 环境参数

2.2.1 潮

2.2.1.1 当水深是一个重要参数时，比如确定波浪作用、确定管道铺设作业计划、确定最大和最小水压等，潮的影响应给予考虑。

2.2.1.2 潮汐可以分为天文潮、风成潮、压差潮。后两者常组合在一起，称风暴涌。

2.2.1.3 管道所处位置的实际水深等于平均水深加上一个浮动值，该值由天文潮和风暴涌构成。

2.2.1.4 设计潮位应包括设计高/低潮位、平均海平面。

2.2.2 波浪

2.2.2.1 应考虑直接和间接的波浪效应。直接效应指安装期或放置在海床上的管道所受到的波浪直接作用，间接效应的例子如在铺设过程中由于铺管船运动引起的管道运动。

2.2.2.2 所用的波浪理论须能描述管道所在特定水深的波浪运动。

2.2.2.3 要考虑波浪的折射、浅水化、遮蔽和反射效应。

2.2.2.4 如果管道紧靠其他的结构构件，确定波浪作用时要考虑来自流场干扰的可能影响，这种影响可以由流速的增加或减小引起，或者由靠近的结构件产生涡流释放

的动力振动引起。

2.2.3 海流

2.2.3.1 在考虑海流作用时，合成的流速应包括潮流、风成流、风暴增水流、密度流和其他可能的海流现象。对于近岸区域，由波浪破碎产生的沿岸流也要考虑。

2.2.3.2 在管道的施工期间要考虑沿水深分布的流向和流速。

2.2.4 地震

2.2.4.1 若海底管道处于地震活动区域，则需要考虑地震载荷的影响。相关区域的地震活动水平一般由以前的记录或者详细的地质调查结果给出。

2.2.4.2 海底管道设计中，一般将地震水平分为强度水平和韧性水平。管道应能保证在强度水平地震下不发生损害，在韧性水平地震下不发生结构失效。

2.2.4.3 描述地面运动的参数一般包括两个水平分量和一个垂直分量，三个分量同时作用于管道。

2.2.4.4 管道系统应考虑由地震引起的惯性力和流体压力的作用和影响。

2.2.5 海生物

2.2.5.1 海生物对海底管道的影响应给予考虑，并且要考虑特定区域有关的生物和其他环境现象。

2.2.5.2 计算海生物对管道水动力的影响时，要考虑管道的有效直径的增加、表面粗糙度的增加、重量的增加等方面。

2.2.6 温度

应考虑气温、水温和海底泥温以及这些温度变化规律对海底管道的影响。其中安装期和运行期可能的最低和最高温度值是设计要用的重要参数。

2.2.7 土壤条件

应沿管道路由调查提供海床表层和底层土壤的分类、密度、剪切强度、含水量、土粒比重等参数，并结合环境条件参数给出冲刷和液化的可能性及趋势。

2.2.8 海冰

2.2.8.1 在登岸段和极浅海的潮间带，海底管道将受冰载荷的作用。这些作用和影响可能有：

- (1) 在海流和风的作用下，大面积冰原呈整体移动；
- (2) 自由漂流的流冰冲击；
- (3) 冰的挤压力；
- (4) 冰的磨损作用；

(5) 在铺设、安装作业期间冰对施工的干扰。

2.2.8.2 在考虑海冰作用时，一般需要如下的资料：

(1) 冰的物理力学性能指标，包括：密度、含盐度、弹性模量、单轴抗压强度、弯曲强度以及极限抗压强度与加载速率的关系等；

(2) 流冰冰块的大小、流向、流速；

(3) 流冰期间的气温、水温及冰温；

(4) 冰期的时间和范围等。

第3章 载 荷

3.1 通则

3.1.1 海底管道所受的载荷应按如下分类：

- (1) 功能载荷；
- (2) 环境载荷；
- (3) 建造载荷，又分为功能载荷和环境载荷；
- (4) 偶然载荷。

3.1.2 只要是保守的，简化方法和分析可用来计算载荷效应。模型试验可用以与理论计算相结合，也可代替理论计算。

3.2 载荷效应系数与载荷组合

管道系统的每个部分都要按表3.2（1）给出的最不利载荷组合来校核。其中载荷组合 a 是系统检查，只有系统效应存在时才适用。

载荷效应系数和载荷组合

表3.2（1）

极限状态/载荷组合		功能载荷	环境载荷	偶然载荷	压力载荷
		γ_F	γ_E	γ_A	γ_P
SLS& ULS	a	1.2	0.7	—	1.05
	b	1.1	1.3	—	1.05
FLS		1.0	1.0	—	1.0
ALS		1.0	1.0	1.0	1.0

表3.2（2）给出了条件载荷效应系数的取值。

条件载荷效应系数 γ_c

表3.2（2）

条 件	γ_c
管道被搁在不平坦的海床或处于迂回曲折的状况	1.07
连续刚性支撑	0.82
系统压力试验	0.93
其他	1.00

注：① 不平坦的海床条件是相对于自由悬跨管道而言，甚至当管道在不平坦的海床上处于迂回状

况时都应用同样的系数。

② 连续的刚性支撑表示载荷的主要部分还是由位移条件控制的，比如管子卷筒上时。

③ 可能同时需要几个条件系数，比如对在不平坦海床上管道的压力试验，导致条件系数将为：

$$1.07 \times 0.93 = 1.00$$

3.3 功能载荷

3.3.1 由管道系统存在和预期使用所引起的载荷称为功能载荷。要考虑建造和运行期间保证管道完整性的所有载荷效应。当确定功能载荷时，至少要考虑以下因素所产生的载荷效应：

(1) 重量,包括管道本身和内含物的重量、浮力、涂层和牺牲阳极重量、海生物以及其他管道附着物的重量；

(2) 外部静水压力；

(3) 介质温度；

(4) 来自部件（法兰，夹具等）的反作用力；

(5) 覆盖物（如土壤、岩石、垫子等）；

(6) 正常运行期间的内部压力；

(7) 海床的反作用力（摩擦及旋转刚度）；

(8) 预应力；

(9) 支撑结构的永久变形；

(10) 由地面下沉所导致的竖向和横向永久变形；

(11) 由频繁的清管工作所引起的载荷。

3.3.2 特征载荷效应

特征功能载荷效应是指在所考虑的期限内最有可能发生的载荷最大值。当外压增加管道的承压能力时，采用的外压不能高于相应位置处低潮位时的水压。同样，当外压减少管道的承压能力时，采用的外压不能低于相应位置处高潮位时的水压。

除下列两种情况使用正常操作压力和正常操作温度计算外，其他运行条件下的计算需采用设计压力和最大/最小设计温度（取较保守的）。

(1) 疲劳分析；

(2) 环境载荷起控制作用的情况。

3.4 环境载荷

环境载荷是周围环境作用于管道系统上的载荷，不属于功能载荷或偶然载荷。这里只叙述海底管道所受的环境载荷，不包括立管所受载荷。

3.4.1 一般要求

环境载荷实际上属于随机载荷，原则上以概率统计方法进行计算。对于有可能同时发生的各种不同环境现象，应按照适当的组合将其作用效果进行叠加。

3.4.2 流体动力载荷

流体动力载荷是指管子和周围液流之间的相对运动产生的流动诱发载荷。计算时,要考虑流体质点相对速度和加速度,必要时还应计入波浪、海流的分布和管子运动的影响。须考虑以下流体动力载荷:

- (1) 与水质点的绝对速度或相对速度一致的阻力和升力;
- (2) 与水质点的绝对速度或相对速度一致的惯性力;
- (3) 由于涡流激振和其他不稳定现象产生的流动诱发循环载荷;
- (4) 由于波浪撞击产生的冲击载荷;
- (5) 由于波浪作用产生的浮力变化。

3.4.3 波浪和海流载荷

3.4.3.1 按公认的办法和合适的波浪理论来计算作用于管道上的波浪和流引起的载荷。

3.4.3.2 裸置海底水平管道上的波浪力计算:

(1) 若波长大于5倍的管道外径,则按小尺度孤立柱来计算,可以采用Morison方程来确定单位长度管道所受水平波浪力:

$$f = \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| + C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u} \quad (3-1)$$

式中: ρ ——海水密度;

C_D ——垂直于管轴的阻力系数;

C_M ——惯性力系数;

D ——管道的有效外径(含防腐层、加重层以及海生物附着层);

u ——垂直于管轴线的水质点相对于构件的速度分量;

$\dot{u}$ ——垂直于管轴线的水质点相对于构件的加速度分量。

(2) 单位长度上升力的计算公式为:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho D C_L u^2 \quad (3-2)$$

式中: C_L ——升力系数;

其余符号意义同式(3-1)。

3.4.3.3 可以用模型试验数据和工程实践数据确定相关流体动力系数 C_D, C_M, C_L 等,当无试验数据或资料不足时,可参照我社《海底管道系统规范》附录A6~A8的推荐值。

3.4.3.4 若波长小于5倍管径,需根据三维水动力理论来建立管子的运动方程,进而计算波浪载荷。

3.4.3.5 波浪理论的选取应根据不同条件分别予以考虑：

当 $h/\lambda > 0.2$ ， $H/h \leq 0.2$ 时，一般采用线性波理论；

当 $0.1 < h/\lambda < 0.2$ ， $H/h > 0.2$ 时，一般采用Stokes五阶波理论；

当 $0.04 \sim 0.05 < h/\lambda < 0.1$ ，一般采用椭圆余弦波理论。

式中： H ——设计波高；

λ ——设计波长；

h ——水深。

3.4.3.6 要确定作用在管道上的海流引起的阻力和升力，并按照公认的波流耦合理论将其与波浪引起的力相结合。可采用流和波浪诱发的水质点运动速度矢量相加的方法。

3.4.3.7 对位于固定边界或靠近固定边界布置的管道（如悬跨管道），须将垂直于管子轴线的升力和垂直于速度矢量的升力计算在内。

3.4.3.8 在确定波浪和海流的载荷时，要考虑邻近结构部件的影响。要考虑由涡流激振诱发的横向振动所导致阻力系数的增加。

3.4.4 特征载荷效应

3.4.4.1 对于每一种载荷及设计条件，用同时作用的载荷最不利的位置、方向及相关组合来证明管道的完整性。

3.4.4.2 安装阶段

在管道系统的安装过程中，环境特征载荷取所考虑的时间周期中给定海况下的最大值，该海况由 (H_S, T_p) 以及相应的海流条件确定。特征载荷效应被定义为最大的载荷效应 L_E ，由下式计算：

$$F(L_E) = 1 - \frac{1}{N} \quad (3-3)$$

式中： $F(L_E)$ 是 L_E 的概率分布函数， N 是在持续时间不小于3小时海况下的载荷效应循环次数。

3.4.4.3 运行状态

对于运行状态，特征组合环境载荷效应取一年超越概率为1%的值，当不同的载荷分量（例如波浪、流、地震等）之间的相互关系未知时，可用表3.4.4.3中的载荷组合（即同时作用的环境载荷）。

用年超越概率表示的特征环境载荷组合

表3.4.4.3

波 浪	海 流	地 震
10^{-2}	10^{-1}	
10^{-1}	10^{-2}	
		10^{-2}

3.4.4.4 临时条件

对于临时条件下的在海床上的海底管道，特征组合环境载荷效应取值如下：

- (1) 如时间不超过3天，特征载荷效应可以依据可靠的大气预报来决定；
- (2) 对于临时条件下的在海床上的管道，所考虑的时间周期可以取10年的重现期的值，相关的时间周期不应小于1季（即3个月），如果环境载荷的联合分布未知，则组合特征载荷可以采用类似运行状态的组合原则，即10年波浪加1年流或1年波浪加10年流。

3.5 建造载荷

3.5.1 建造载荷即管道系统在建造时，包括安装、压力试验、试运行、维护和修理阶段所产生的载荷，又可分为功能载荷和环境载荷。要考虑在运输、建造、安装、维护和修理期间作用于管节点和管截面上的所有有效载荷。

3.5.2 在建造期间载荷组合效应要考虑选择可能遇到的最恶劣的载荷组合。

3.6 偶然载荷

3.6.1 偶然载荷是在异常和意外情况下施加于管道系统上的载荷。把一个载荷归类为偶然载荷最主要的标准是看它发生的概率。典型的偶然载荷可能由下列因素造成：

- (1) 船舶或其他飘浮物的冲击（碰撞、下沉、搁浅）；
- (2) 坠落物的撞击；
- (3) 泥土滑移；
- (4) 爆炸；
- (5) 火灾和热流；
- (6) 误操作；
- (7) 锚的拖拉。

3.6.2 对管道系统中预计容易遭受偶然载荷作用的管段和附件，应采取切实有效的保护措施，以防止偶然载荷对管道系统造成危害。

3.7 其他载荷

3.7.1 拖网载荷

典型拖网载荷的计算可参照 DNV指南 N13 “拖网渔具与管道之间的相互作用”。

3.7.2 地震载荷

3.7.2.1 由地震产生的载荷效应，可以归入偶然载荷或者是环境载荷，这取决于地震发生的概率。一般设计中将百年一遇地震条件作为环境载荷，两百年一遇或者千年

一遇地震条件作为偶然载荷来考虑。如表3.4.4.3中，运行状态的环境载荷组合中就将地震载荷作为环境载荷考虑。

3.7.2.2 当地震载荷作为环境载荷考虑时，不应与其他环境载荷相组合。

3.7.3 冰载荷

3.7.3.1 在可能结冰或有浮冰的海域，应考虑作用于管道系统的各种冰载荷的可能性。这些作用力可能一部分是由结在管道系统上的冰造成，一部分可能是由浮冰作用造成的。对于管道近岸段和浅水地区，还应考虑浮冰的磨损、撞击以及堆积作用的可能性。

3.7.3.2 管道系统水面以上部分处于冰冻情况时（如由于浪花飞溅等造成），应考虑下述载荷的作用：

- （1）冰的重量；
- （2）由于冰融化后冰块移动所产生的撞击力；
- （3）由于冰的膨胀产生的作用力；
- （4）由于暴露部分的面积或体积增大而引起的风力和波浪力的增加。

第4章 管道的在位结构强度分析

4.1 通则

4.1.1 本章内容提供了对管道系统结构在位可能失效模式的验收准则。

4.1.2 强度分析必须建立在可接受的静力学、动力学、材料强度和土力学的原理上，并应符合相应的规范和本指南要求。

4.1.3 如果简化方法或简化分析是保守的，则可以采用这些方法和分析进行强度计算。模型试验可以用来配合或代替理论计算。在理论计算方法不适宜的情况下，可以要求做模型试验或全尺度试验。

4.1.4 凡可能影响管道完整性的荷载和强迫位移均应予以考虑，对于应考虑管道系统的每一横截面或部件，以及分析中可能发生的每一种失效模式，都应考虑到可能同时作用荷载的所有组合。

4.1.5 当确定动荷载的响应时，如认为影响显著，应考虑动力效应。

4.2 极限状态下的失效模式和控制条件

4.2.1 失效模式

4.2.1.1 作为最低要求，管道要能防下列几种可能的失效模式。

(1) 操作极限状态：

- ① 椭圆化/棘齿极限状态；
- ② 累积塑性应变极限状态；
- ③ 由于配重层的损伤或脱落。

(2) 极端极限状态：

- ① 破裂极限状态；
- ② 椭圆化/棘齿极限状态（如果导致整体失效）；
- ③ 局部屈曲极限状态（管壁屈曲极限状态）；
- ④ 总体屈曲极限状态（通常对于荷载控制条件）；
- ⑤ 不稳定断裂和塑性压溃极限状态；
- ⑥ 冲击。

(3) 疲劳极限状态：

- ① 循环荷载导致的疲劳。

(4) 偶然极限状态:

- ① 落物;
- ② 拖网渔具的破坏;
- ③ 地震。

4.2.1.2 所有极限状态必须满足于全部规定的荷载组合, 荷载组合见第3.2。对于荷载控制条件和位移控制条件极限状态可能不同。

4.2.1.3 所有极限状态应满足所有相关阶段和工况, 在管道设计中所涉及的典型工况有:

- (1) 安装;
- (2) 铺设;
- (3) 系统压力测试;
- (4) 操作;
- (5) 关断。

4.2.2 控制条件

4.2.2.1 有两种控制条件用于设计校核或给出极限状态:

- (1) 荷载控制条件(LC条件): 结构响应主要由所施加的荷载控制;
- (2) 位移控制条件(DC条件): 结构响应主要由所施加的几何位移控制。

4.2.2.2 荷载控制条件的特点是荷载在合理限度内且与相关位移无关。

4.2.2.3 位移控制条件的特点是位移在合理限度内且与相关荷载无关。

4.2.2.4 设计校核中经常使用荷载控制条件, 其要比位移控制条件为基础进行的设计校核更保守。

4.3 强度分析流程

4.3.1 管道强度分析的基本流程如图4.3.1所示, 分析循环必须在每一个相关阶段重复进行。

4.3.2 分析流程的主要内容及一般顺序是: 承压(破裂)控制分析、屈曲分析(包括外压单独作用、组合荷载作用)、疲劳分析、椭圆化分析、累积塑性应变分析和断裂分析。

4.3.3 屈曲分析包括局部屈曲、屈曲扩展和整体屈曲。

4.4 承压(破裂)控制

4.4.1 压力应符合公式4-1要求:

$$p_{li} - p_e \leq \frac{p_b(x)}{\gamma_{sc}\gamma_m} \quad (4-1)$$

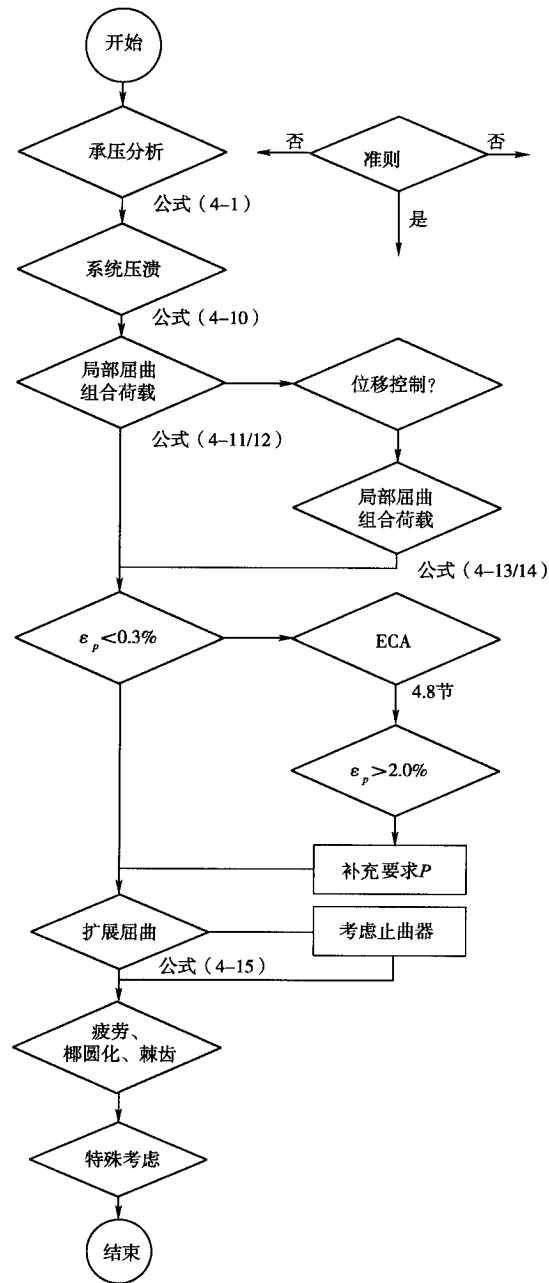


图4.3.1 管道结构强度分析流程图

式中: p_{li} ——局部偶然压力;

p_e ——外压;

$p_b(x)$ ——承压抗力, 见4.4.2;

γ_{sc} ——安全等级抗力系数, 见1.4.5.2;

γ_m ——材料抗力系数, 见1.4.5.2。

4.4.2 压力控制抗力 $p_b(x)$ 由下式给出:

$$p_b(x) = \min(p_{b,s}(x); p_{b,u}(x)) \quad (4-2)$$

(1) 屈服极限状态:

$$p_{b,s}(x) = \frac{2 \cdot x}{D - x} \cdot f_y \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (4-3)$$

(2) 破裂极限状态:

$$p_{b,u}(x) = \frac{2 \cdot x}{D - x} \cdot \frac{f_u}{1.15} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (4-4)$$

式中: f_y ——设计屈服强度;

f_u ——设计拉伸强度;

D ——管道名义外径。

使用上面公式时应选择适当的 t_1 或 t_2 代替 x , 见4.4.3。

4.4.3 压力控制抗力计算应该建立在下列壁厚的基础上:

(1) 静水压试验和系统压力试验:

$$t_1 = t - t_{fab} \quad (4-5)$$

(2) 运行状态:

$$t_1 = t - t_{fab} - t_{corr} \quad (4-6)$$

(3) 建造(安装):

$$t_2 = t \quad (4-7)$$

(4) 其他:

$$t_2 = t - t_{corr} \quad (4-8)$$

式中: t_1, t_2 ——管道壁厚;

t ——管道名义壁厚;

t_{corr} ——管道壁厚腐蚀裕量；

t_{fab} ——管道壁厚制造公差。

4.4.4 荷载控制条件下，应考虑由于轴向压力导致的承压能力降低。

4.5 屈曲

4.5.1 屈曲种类

屈曲的种类一般分为：

4.5.1.1 局部屈曲（管壁屈曲），导致管道横截面变形；

4.5.1.2 整体屈曲（欧拉屈曲），管道像压杆一样的变形。

4.5.2 局部屈曲

4.5.2.1 局部屈曲是由下列因素导致的横截面变形：

（1）仅有外压作用的系统压溃；

（2）外压或内压、轴向力和弯矩的组合作用；

（3）扩展屈曲。

4.5.2.2 应考虑大的累积塑性应变可能会加剧局部屈曲。

4.5.2.3 仅有外压作用的系统压溃校核准则：

（1）海底管道的寿命期内，存在空管或内压低于外压的情况，此时可能产生外压引起的压溃。外压压溃的特征抗力（ p_c ）应按下式计算：

$$(p_c - p_{el}) \cdot (p_c^2 - p_p^2) = p_c p_{el} p_p f_0 \frac{D}{t_2} \quad (4-9)$$

式中：

$$p_{el} = \frac{2E \left(\frac{t_2}{D} \right)^3}{1 - \nu^2}$$

$$p_p = 2 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \frac{t_2}{D}$$

$$f_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} < 0.005$$

E ——弹性模量；

ν ——泊松比；

f_0 ——椭圆度；

$D_{\max}$ ——最大测量外径；

$D_{\min}$ ——最小测量外径；

α_{fab} ——制造系数，见表4.5.2.3。

该公式计算中使用的总椭圆度应包括建造阶段产生的椭圆度，但不包括由外部水压力或者弯矩作用产生的椭圆度。

制 造 系 数

表4.5.2.3

管 类 型	无 缝 管	焊接、三轧辊工艺管	焊接、膨胀工艺管
α_{fab}	1.00	0.93	0.85

这个三次多项式有如下的解析解：

$$p_c = y - \frac{b}{3}$$

式中： $b = -p_{el}$

$$c = -\left(p_p^2 + p_p p_{el} f_0 \frac{D}{t_2}\right)$$

$$d = p_{el} p_p^2$$

$$u = \frac{1}{3} \left(-\frac{1}{3} b^2 + c \right)$$

$$v = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{27} b^3 - \frac{1}{3} bc + d \right)$$

$$\Phi = \arccos \left(\frac{-v}{\sqrt{-u^3}} \right)$$

$$y = -2\sqrt{-u} \cos \left(\frac{\Phi}{3} + \frac{60\pi}{180} \right)$$

(2) 沿管道方向上任一点的外压应满足下列要求（系统压溃校核）：

$$p_e \leq \frac{P_c}{1.1 \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \quad (4-10)$$

如果管道铺设时管内全部或部分充满液体，或有其他形式的内压作用时，如内压能连续保持，则可以考虑内部压力。

4.5.2.4 荷载控制条件下的组合荷载作用校核准则：

(1) 受弯矩、有效轴力和内部过压的管道在所有的横截面上都应满足下列要求：

$$\gamma_{sc} \gamma_m \left(\frac{S_d}{\alpha_c S_p} \right)^2 + \gamma_{sc} \gamma_m \left[\frac{M_d}{\alpha_c M_p} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta p_d}{\alpha_c p_b(t_2)} \right)^2} \right] + \left(\frac{\Delta p_d}{\alpha_c p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (4-11)$$

$$D/t \leq 45, p_i \geq p_e$$

式中： M_d ——设计弯矩，见1.4.5.2；

S_d ——设计有效轴力，见1.4.5.2；
 Δp_d ——设计压力差，见1.4.5.2；
 M_p ——塑性弯矩抗力，按下式计算： $M_p = f_y \cdot (D - t_2)^2 \cdot t_2$ ；
 S_p ——特征塑性轴向抗力，按下式计算： $S_p = f_y \cdot \pi \cdot (D - t_2) \cdot t_2$ ；
 $p_b(t_2)$ ——破裂压力，计算公式见4.4.2；
 α_c ——考虑应变硬化的流动应力参数，按下式计算：
 $\alpha_c = 1 - \beta + \beta \frac{f_u}{f_y}$ ，但 α_c 最大值取1.20，其中

$$\beta = \begin{cases} (0.4 + q_h) & D/t_2 < 15 \\ (0.4 + q_h)(60 - D/t_2)/45 & 15 \leq D/t_2 \leq 60 \\ 0 & D/t_2 > 60 \end{cases}$$

$$q_h = \begin{cases} \frac{(p_{ld} - p_e)}{p_b(t_2)} \frac{2}{\sqrt{3}} & p_{ld} > p_e \\ 0 & p_{ld} \leq p_e \end{cases}$$

p_{ld} ——局部设计压力；

p_i ——特征内压。

(2) 受弯矩、有效轴力和外部过压的管道应满足下列公式：

$$\left[\gamma_{sc} \gamma_m \left(\frac{M_d}{\alpha_c M_p} \right) + \gamma_{sc} \gamma_m \left(\frac{S_d}{\alpha_c S_p} \right)^2 \right]^2 + \left(\gamma_{sc} \gamma_m \frac{p_e}{p_c} \right)^2 \leq 1 \quad (4-12)$$

$D/t \leq 45$, $p_i < p_e$

4.5.2.5 位移控制条件下的组合荷载作用校核准则：

(1) 受轴向压应变（弯矩和有效轴力）和内部过压的管道在所有的横截面上应变控制应满足下列要求：

$$\varepsilon_d \leq \frac{\varepsilon_c}{\gamma_\varepsilon} \quad D/t \leq 45, \quad p_i \geq p_e \quad (4-13)$$

$$\varepsilon_c = 0.78 \left(\frac{t_2}{D} - 0.01 \right) \left(1 + 5 \frac{\sigma_h}{f_y} \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw}$$

$$\sigma_h = \Delta p_d \left(\frac{D - t_2}{2t_2} \right)$$

式中： ε_d ——设计压应变，见1.4.5.2；

α_h ——最大许用屈服强度和拉伸强度的比率；

α_{gw} ——围焊系数；

γ_ε ——应变抗力系数，见表4.5.2.5。

(2) 受轴向压应变（弯矩和有效轴力）和外部过压的管道在所有的横截面上的应变控制应满足下列要求：

$$\left(\frac{\varepsilon_d}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\gamma_e} \right)} \right)^{0.8} + \frac{p_e}{\left(\frac{p_c}{\gamma_{SC} \cdot \gamma_m} \right)} \leq 1 \quad D/t \leq 45, \quad p_i < p_e \quad (4-14)$$

$$\varepsilon_c = -0.78 \left(\frac{t_2}{D} - 0.01 \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw}$$

对于 $D/t < 20$ 的情况，如果全尺度实验、观测或以前的经验与本指南相容且具有足够安全性，可以改进该方法。但是任何改进方法都要有分析设计方法支持。

应变抗力系数 γ_e

表4.5.2.5

NDT 水平	附加要求	安全等级		
		低	一般	高
I	U	2.0	2.5	3.3
I	-	2.1	2.6	3.5
II	不适用			

注：附加要求U见8.3.4。

4.5.2.6 扩展屈曲分析

只有产生局部弯曲后，才有产生扩展屈曲的可能性。如果外压超过下列公式给出的准则，则宜安装止屈器，止屈器的间距由失效后果决定。

$$p_e \leq \frac{p_{pr}}{\gamma_m \gamma_{SC}} \quad (4-15)$$

式中： p_{pr} ——屈曲扩展压力，按下式计算：

$$p_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \left(\frac{t_2}{D} \right)^{2.5} \quad (4-16)$$

4.5.2.7 造成屈曲扩展的压力有下列规律：

- (1) 压溃压力 p_c 是管道产生屈曲所需的压力；
- (2) 起始压力 p_{init} 是给定屈曲下开始屈曲扩展所需的压力，这个压力与初始屈曲尺寸大小有关；
- (3) 扩展压力 p_{pr} 是使屈曲继续扩展所需的压力，只有当压力比扩展压力小时，屈曲扩展将停止；
- (4) 三种压力之间的关系是： $p_c > p_{init} > p_{pr}$ 。

4.5.3 整体屈曲

4.5.3.1 整体屈曲即管道像压杆一样的屈曲。管道发生整体屈曲的形式有：下陷（在悬跨处）、水平方向屈曲（在海底成蛇行）或者是垂直方向屈曲（隆起状屈曲或

者是在自由悬跨肩部)。

4.5.3.2 进行整体屈曲计算时内外压力的效应可以考虑采用一个有效轴力的概念,按下列公式计算:

$$S = N - p_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D - 2t)^2 + p_e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (4-17)$$

式中: N ——管壁力(“真正的”轴向力);

S ——有效轴向力(拉为正),该有效力等于空气中“普通”受压构件内实际的轴向力。

4.5.3.3 正在铺设时,管道的温度和内压与管道放置的时候相同,则:

$$S = H \quad (4-18)$$

式中: H ——有效残余铺设张力。

4.5.3.4 在线弹性应力范围内,被完全约束的管子由于压力和温度的作用将承载的有效轴向力按下列公式计算(管道为理想的薄壁管):

$$S = H - \Delta p_i \cdot A_i \cdot (1 - 2\nu) - A_s \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (4-19)$$

式中: Δp_i ——相对于铺设时的内压差;

A_i ——管道内孔截面面积;

A_s ——管道钢截面面积;

ΔT ——相对铺设时的温度差;

α ——热膨胀系数。

4.5.3.5 负的有效轴力可能会导致管道像受压杆一样的屈曲。应区别荷载控制和位移控制屈曲,荷载控制屈曲导致的整体失效是不能被接受的,而如果屈曲后的状态可以接受,则位移控制屈曲也许可以接受,接受条件见4.5.3.6。

4.5.3.6 如果没有发生4.5.1所列之外的其他失效模式,则位移控制屈曲可被接受,即若具备下列情况,整体屈曲可以接受:

- (1) 在整体屈曲发生后的形态满足局部屈曲准则;
- (2) 管道位移可以接受;
- (3) 循环效应可以接受。

4.5.3.7 一条完全被约束的管道产生过度应变的条件是有一小段约束很小或没有约束。埋设管道的隆起屈曲是一个典型例子。

4.5.4 隆起屈曲

4.5.4.1 在导致有限塑性弯曲应变的隆起屈曲情况下,管道可以继续运行,但管道运行参数必须控制在一定的范围内,控制原则是在该范围内可有效阻止管道屈曲截面处低周高应变疲劳损伤的积累。

4.5.4.2 进行隆起屈曲强度分析时,也必须进行局部屈曲、椭圆化和疲劳损伤分析,同时计算方法须得到我社的认可。

4.6 椭圆化

4.6.1 必须有文件证明管道不发生过度椭圆化，由弯曲产生的扁平率加上制管时产生的不圆度不能超过3%，椭圆度的定义如下：

$$f_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \leq 0.03 \quad (4-20)$$

对于下列情况，可以放宽条件要求：

- (1) 已经包括了抗弯矩能力的相应折减；
- (2) 满足几何约束的要求，例如清管要求；
- (3) 已经考虑了由椭圆化产生的附加循环应力；
- (4) 满足相应修复系统的容差要求。

4.6.2 椭圆度必须按沿管道任意点上的点荷载来检验。这些作用的点荷载可以选择在自由悬跨肩部、人工支撑部件和其他支持部件上。

4.7 棘齿效应

4.7.1 应考虑由循环荷载所引起的累积塑性变形（棘齿效应）。如果棘齿效应产生了累积椭圆度，对屈曲抗力的影响应作专门的考虑。

4.7.2 在最大操作温度和压力下，管道的等效塑性应变不应超过0.001。计算以理想弹塑性材料为基础。在计算等效塑性应变时，以管道安装施工中（在压力测试以后）的应变状态为参考零应变状态。

4.7.3 管道的塑性变形应仅发生在管道第一次经受最大温度和压力的时。

4.7.4 也应考虑局部和整体弯曲应力所产生的棘齿效应，这可能最终导致管段失稳。

4.8 累积塑性应变

4.8.1 等效塑性应变只是对塑性变形的一种度量，用于断裂力学评估和材料特性降低分析。

4.8.2 对所有管道都应考虑在安装和运行期间的累积塑性应变，及由累积塑性应变产生的应变老化的影响。应考虑焊接区和母管材料性能降低的效应和无损检测可接受标准的影响。

4.8.3 管道从建造到废弃的所有阶段，应对每一单个应变循环确定其累积的和最大的两个位移控制的应变变量。

4.8.4 当累积塑性应变是由安装和操作荷载效应（包括荷载系数和所有应变集中系数）引起的，且 $\varepsilon_p \leq 0.3\%$ 时，则对材料，焊接程序，工艺以及无损检验接受标准的

要求应予以充分考虑。

4.8.5 当累积塑性应变是由安装和操作，包括所有应变集中系数引起的，且： $\varepsilon_p > 0.3\%$ ，则要对安装期环焊缝进行工程风险评估（ECA）。

4.8.6 当累积塑性应变是由安装和操作，包括所有应变集中系数引起的，且： $\varepsilon_p > 2.0\%$ ，则不仅要进行4.8.5的分析，且要验证特征应变抗力。

4.8.7 如果有塑性应变，则要考虑和测定应变集中系数（SNCF）。对于非线性应力—应变关系，针对相应的荷载水平，需调整SNCF。

4.8.8 下列情况应考虑应变集中：

- （1）由变化的材料实际屈服应力引起的不规则变形；
- （2）管道节点间横截面面积（实际直径或者壁厚）的变化；
- （3）涂层的刚度影响，以及涂层厚度的变化；
- （4）安装期间节点涂层敷用而施加的高温导致节点区域内屈服应力的降低；
- （5）实际焊接材料的屈服应力相对管道材料的屈服应力有高有低。

4.8.9 累积塑性应变定义为塑性应变增量的总和，不管符号和方向。应变增量要从管子制作完成以后开始计算。

4.8.10 塑性应变增量的计算要从材料应力应变曲线上偏离线形关系的那一点开始，如图4.8.10所示，图中屈服应力定义为整体应变0.5%处对应应力。

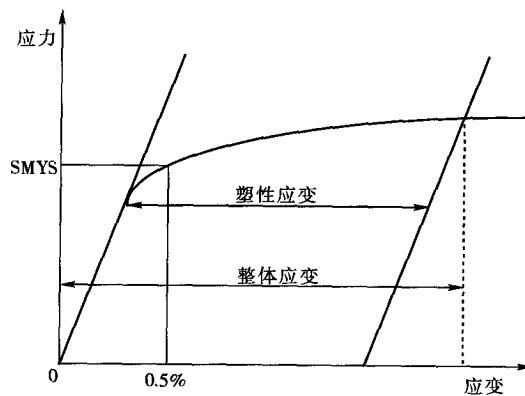


图4.8.10 塑性应变计算参考

4.8.11 等效塑性应变定义如下：

$$\varepsilon_p = \sqrt{(2/3)(\varepsilon_{pL}^2 + \varepsilon_{pH}^2 + \varepsilon_{pR}^2)} \quad (4-21)$$

式中： ε_p ——等效塑性应变；

ε_{pL} ——轴向主要应变的塑性部分；

ε_{pH} ——环向主要应变的塑性部分；

ε_{pR} ——径向主要应变的塑性部分。

4.9 断裂

4.9.1 管道系统应具有防止不稳定断裂发生的足够抗力，为此应选择那些从脆性到韧性的转变温度比最小设计温度足够低的管道材料。

4.9.2 若材料、焊接、工艺和试验都能符合我社《海底管道系统规范》的要求且累积塑性应变不超过0.3%，则认为管道满足防止不稳定断裂的安全度要求。

4.9.3 输送高压气体或气液混合物的管道，必须具有足够的抗断裂扩展能力。可通过下列方法实现：

- (1) 低转变温度和足够夏比V型缺口韧性的材料；
- (2) 足够的落锤撕裂试验（DWTT）剪切断裂面积；
- (3) 降低应力水平；
- (4) 使用机械式止裂器；
- (5) 组合采用上述方法。

设计方案必须由基于相应经验和/或适当试验的计算来支持。

4.9.4 管道铺设在水下10m以上或在岸上时，管道材料夏比V型缺口冲击能量应该特殊考虑。深水管道在外压的作用下拉伸应力将会减小。当管道设计的环向拉伸应力小于 f_y 的40%时，不需要应用止裂特性要求。

4.9.5 对于累积塑性应变超过0.3%的管道，应该进行工程临界评估（ECA）以确保不稳定断裂不会在管道铺设或运行阶段发生。

4.9.6 可能的稳态裂纹生长（延性撕裂）和高周、低周疲劳裂纹生长在评估时应该考虑。评估的目的是确保在无损伤检验（NDT）后，仍可能存在的最大焊接缺陷在铺管过程中不会增长到不稳定断裂或疲劳失效出现的程度。

4.9.7 应变老化对断裂韧性的影响，应该通过人工测试应变老化材料方式给予考虑。

4.10 疲劳

4.10.1 要确保管道系统在设计寿命内有足够的安全性以防止疲劳破坏的发生。

4.10.2 当确定应力范围的长期分布时，包括管道系统建造阶段在内的整个设计寿命年限内所施加的所有应力波动，若其大小和数量足以导致疲劳效应的，均应予以考虑。疲劳校核包括低周疲劳和高周疲劳，有关累积塑性应变的要求也应予以满足。导致管道系统应力波动的典型原因有：

- (1) 直接波浪作用；

- (2) 管道系统振动, 例如: 海流、波浪引起的涡激振荡;
- (3) 支撑结构移动;
- (4) 操作压力和温度的波动。

4.10.3 对可能引起应力集中和存在低周高应力疲劳可能性的结构局部, 其疲劳评价应给予专门考虑。具体采用的准则取决于分析的方法, 其方法可以划分为:

- (1) 基于断裂力学的方法;
- (2) 基于疲劳试验的方法。

4.10.4 在合适的情况下可使用基于断裂力学的计算方法, 所使用的判断准则应根据具体情况而定, 但须达到1.4.6中要求的安全水平。

4.10.5 当使用基于疲劳试验的计算方法时, 应考虑以下几点:

- (1) 应力范围长期分布的确定, 见4.10.6;
- (2) 选择合适的 $S-N$ 曲线(特征抗力), 见4.10.7;
- (3) 不包括在 $S-N$ 曲线中的应力集中系数(SCF)的确定;
- (4) 累积损伤的确定, 见4.10.8。

4.10.6 产生疲劳作用的大多数荷载属于随机性质, 为确定疲劳荷载效应的长期分布, 通常使用统计学分析方法, 在适当的情况, 也可采用谱分析和定量分析方法。

4.10.7 抗力通常以 $S-N$ 曲线或 $\varepsilon-N$ 曲线表示。即应力幅值(或者低周疲劳引起的应变幅值)与相应的疲劳破坏周期数 N 之间的关系曲线。 $S-N$ 曲线应能适用于所研究的材料、结构构件、应力状态和周围的环境。该 $S-N$ 曲线宜根据平均的 $\log(N)$ 曲线减去两个标准偏差。

4.10.8 在应力出现无规则变化的情况下, 可以利用线性损伤的假定(米勒法则)。米勒法则的应用意味着应力范围的长期分布被应力频率曲线所代替, 它由恒定变幅应力数 $(\sigma_r)_i$ 或应变范围块 $(\varepsilon_r)_i$ 的重复数 n_i 所组成。疲劳判据按下列公式表述:

$$D_{fat} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq \alpha_{fat} \quad (4-22)$$

式中: D_{fat} ——米勒数;

k ——应力块的数目;

n_i ——在应力块 i 的应力循环次数;

N_i ——在恒定应力值 $(\sigma_r)_i$ 或应变值 $(\varepsilon_r)_i$ 作用下失效的循环数;

α_{fat} ——许用损伤率, 见表4.10.9。

4.10.9 许用损伤率取决于位置、检验维修的可能性、检验的策略和失效的后果。推荐的许用损伤率见表4.10.9。

疲劳许用损伤率

表4. 10. 9

安全等级	低	一般	高
α_{fat}	1/3	1/5	1/10

4. 11 偶然极限状态

4.11.1 偶然荷载抗力分析可以通过直接计算作用在结构上的偶然荷载效应来进行，也可以间接的按结构能承受的偶然荷载来进行。

4.11.2 偶然极限状态的接受标准和总体可接受严重后果的概率相关。

4.11.3 相关偶然荷载的设计必须确保总体失效概率和1.4.6中的目标值一致。这个概率可以表示为第 i 次破坏事件出现的概率 P_{Di} 和在这个破坏事件下出现结构失效的概率 $P_{f|Di}$ 的乘积，用公式表示如下：

$$\sum p_{f|Di} \cdot P_{Di} \leq p_{f,T} \quad (4-23)$$

式中： $p_{f,T}$ ——对应1.4.6中的目标概率。

离散化程度必须足够大以保证估算的概率有足够的准确度。

4.11.4 偶然荷载的频率和大小具有本质不确定性，加上确定偶然荷载效应方法本身的近似特征，偶然荷载抗力分析同时需要可靠的工程判断和实效估计。

4.11.5 如果应用非线性、动态有限元分析法，应保证对所用模型和程序充分考虑了系统性能和局部失效模式（例如：应变率、局部屈曲、接点过载和接点断裂）。

4.11.6 偶然荷载的简化校核可按照列于表4.11.6中的分项安全系数完成。为了保证整个失效概率和1.4.6中的目标值一致，评估简化校核的适应性必须以上述概括为基础。

偶然荷载简化校核的分项安全系数

表4. 11. 6

偶然荷载的简化校核			
出现概率	低安全级	一般安全级	高安全级
$>10^{-2}$	可以认为偶然荷载类似于环境荷载，且可以ULS校核类似估算		
10^{-3}	$\gamma_c=1.0$	$\gamma_c=1.0$	$\gamma_c=1.0$
10^{-4}	可忽略偶然荷载或事件	$\gamma_c=0.9$	$\gamma_c=0.9$
10^{-5}	可忽略偶然荷载或事件		$\gamma_c=0.8$
$<10^{-6}$	可忽略偶然荷载或事件		
$10^{-2} \sim 10^{-3}$	根据不同情况估算		

注：对于出现概率为 10^{-4} 的偶然事件，工程实践一般假设安全系数等于1.0，且管道的生存只和特征抗力的保守定义有关。在这个标准中，引入的偶然荷载和事件一般来说和发生概率及实际失效后果之间的联系有关。对于组合荷载，简化校核方法推荐安全系数在1.1 ~ 1.2的范围内，这个和工程实践中，一般安全等级且发生概率等于 10^{-4} 的偶然荷载一致的。

第5章 铺管作业管道强度分析

5.1 通则

5.1.1 铺管作业前必须做强度分析，分析应考虑到轴向拉力、外压、弯曲应力和铺管作业时动态应力的联合作用。

5.1.2 必须考虑到预定铺管方法和铺管船结构形状的限制影响，以及在铺管过程中可能遇到的最恶劣环境条件。

5.1.3 分析应包括开始铺管、铺管结束、正常铺管、弃管、回收管和管道埋设时所对应的条件。

5.1.4 铺管分析是为了保证在预定铺管程序的各种条件下，管道不会出现过应变、断裂、局部屈曲、涂层和配重层损坏现象。

5.2 铺管强度分析流程和校核准则

5.2.1 进行铺管强度分析的流程如图5.2.1所示，描述如下：

(1) 收集与铺管环境、管道结构及铺管方式相关的强度计算参数，如拖管架的支点布置、张紧器的张力等；

(2) 确定对应铺管方式下的最不利荷载组合，荷载组合见3.2，进行管道的局部屈曲强度分析；

(3) 累积塑性变形分析。

5.2.2 铺管作业是低安全等级，局部强度校核准则见4.5.2组合载荷作用部分。

5.2.3 如果对应安装方法下的累积塑性应变超过0.3%，应该进行环缝焊接的工程临界评估（ECA）。

5.2.4 如果对应安装方法下的累积塑性应变超过2.0%，应该应用断裂力学理论进一步评估管道是否满足使用要求。

5.3 不同铺管方式下的强度计算特点

5.3.1 常用铺设方式包括传统铺管船法、垂直铺管船法、卷管式铺管船法和拖管铺管法。

5.3.2 传统铺管船法，也叫S形铺设法，管道在铺管船上从几乎水平的位置铺设，该铺管船带有水平张紧器和托管架（弯曲限制支撑）。在进行该铺管方式下的强度分析时：

- (1) 应该考虑由于内嵌阀的局部刚度增强所导致的应变集中问题；
- (2) 考虑由于局部刚度的增强，如配重层不连续、止屈器的作用，其导致环缝焊接附近的应变可能比管道其他地方大；
- (3) 应变集中系数的计算建立在应变程度、外覆层厚度或止屈器的壁厚基础上。

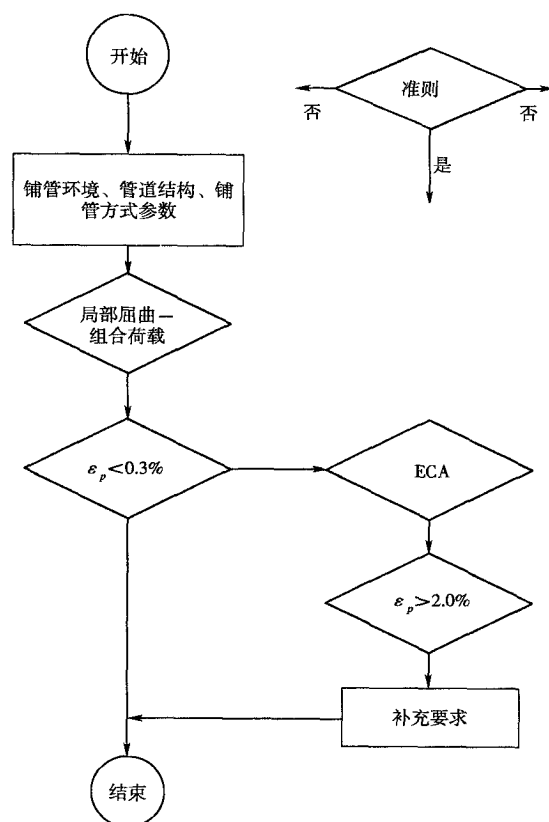


图5.2.1 铺管强度分析流程图

5.3.3 垂直（或接近垂直）铺管船法，也叫J形铺管法，管道从铺管船上的高架塔铺设，铺管船上带有轴向张紧器，带或不带托管架主要依据管道是否会在海面上出现过度弯曲确定。在进行该铺管方式下的强度分析时，所考虑的问题同S形铺设法。

5.3.4 卷管式铺管船法，管道在远处建造，缠绕在一个大半径卷筒上后装上卷管式铺管船，铺管时用一个切向张紧器抽出，带或不带托管架，通常在船上有反弯设备拉直管道。在进行该铺管方式下的强度分析时，应该考虑管道从卷筒上抽出时的拉力及反弯器的作用。

5.3.5 拖管铺设法，管道被从位于远处的建造点通过在水面上、水下某一控制深度或海床上拖到铺设地点铺设的方法。

第6章 悬跨管道强度分析

6.1 通则

6.1.1 对于所有临时或长期悬跨的管道，应该同时分析其抗疲劳强度和局部屈服强度以保证完整性。

6.1.2 如果满足指定的疲劳和极端极限状态（ULS）准则进行了验证，由涡激发散和直接波浪导致的振动是可以接受的。

6.1.3 为了防止在给定流速下管道可能遭受几种不同振动模态的作用，进行疲劳分析时应采用对管道疲劳损伤贡献最大的振动模态。除非另有文件说明，所有模态对管道的损伤贡献涉及同样的关键（焊接）位置。

6.1.4 分析一般要求：

- （1）疲劳分析应覆盖悬跨出现的整个周期；
- （2）疲劳分析应该考虑在管道整个设计寿命周期中，会造成疲劳损伤的所有应力波动；
- （3）必须对悬跨管道的所有截面进行局部疲劳强度校核，应考虑悬跨管段本身及相邻悬跨段所有振动模态的损伤作用。

6.1.5 图6.1.5给出对悬跨管道进行强度校核的流程图，描述如下：

- （1）收集悬跨管道分析的数据；
- （2）进行悬跨管道疲劳筛分分析，目的是判断管道在涡激振动和直接波浪作用下是否发生一阶振动疲劳失效；
- （3）如果是，则需进行悬跨管道的详细疲劳失效分析；
- （4）反之，仅需进行悬跨管道的极端极限状态分析，这个分析也是必须进行的。

6.2 筛分疲劳分析

6.2.1 筛分分析适用于在波浪、流的组合作用下，由涡激振动和直接波浪导致的疲劳损伤。该准则的检验不同于因管道设计疲劳寿命超过50年进行的完全疲劳分析，其应用于一阶对称模态疲劳损伤占主要作用的振动，且宜首先进行，如果不符合该准则，应该进行完全疲劳强度分析。ULS准则的强度校核必须进行。

6.2.2 筛分分析建立在流速符合3参数威布尔（Weibull）分布的假设上，如果不符合该分布，必须用完全疲劳分析来校核该分析的结果。

6.2.3 悬跨管道与流同向自振频率 $f_{0,IL}$ 必须满足下式：

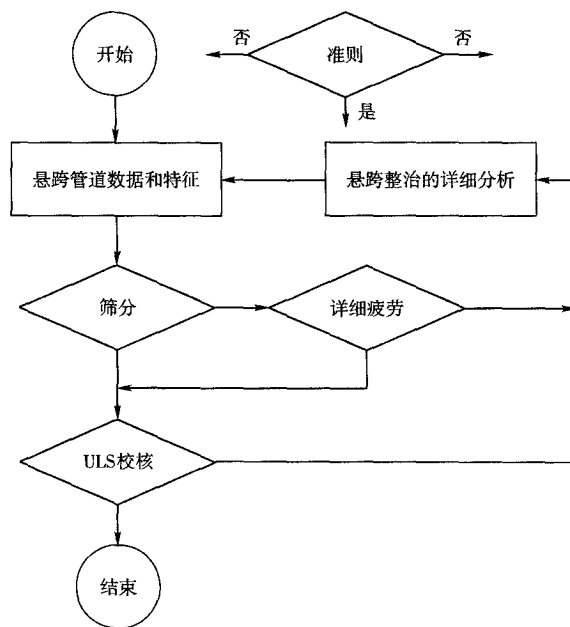


图6.1.5 悬跨管道强度校核流程图

$$\frac{f_{0,IL}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100year}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \cdot \frac{\gamma_{IL}}{\bar{\alpha}} \quad (6-1)$$

式中: γ_f ——自振频率的安全系数, 见6.5;

γ_{IL} ——与流同向筛分系数, 见6.5;

$\bar{\alpha}$ ——流速比, 按下式计算: $\bar{\alpha} = \max\left(\frac{U_{c,100year}}{U_{w,1year} + U_{c,100year}}; 0.6\right)$;

D ——取管道的实际外径 (包含涂层);

L ——自由悬跨长度;

$U_{c,100year}$ ——在管道铺设水平面上的百年一遇海流流速;

$U_{w,1year}$ ——在管道铺设水平面上, 一年一遇有效波高下的波浪导致流速值;

$V_{R,onset}^{IL}$ ——与流同向折算速度起始值。

如果不满足上面公式, 则要求进行与流同向涡激振动作用下的完全疲劳分析。

6.2.4 悬跨管道与流垂向自振频率 $f_{0,CF}$ 必须满足

$$\frac{f_{0,CF}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100year} + U_{w,1year}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \cdot \gamma_{CF} \quad (6-2)$$

式中: γ_{CF} ——与流垂向筛分系数, 见6.5;

$V_{R,onset}^{CF}$ ——与流垂向折算速度起始值。

如果不满足上面公式，则要求同时进行与流同向、垂向涡激振动作用下的完全疲劳分析。

6.2.5 如果满足：

$$\frac{U_{c,100year}}{U_{w,1year} + U_{c,100year}} > \frac{2}{3} \quad (6-3)$$

和前面管道与流同向振动的筛分标准，不要求进行直接波导致疲劳损伤的完全疲劳分析；如果不满足，两者都需要。

6.3 完全疲劳分析

6.3.1 完全疲劳准则用公式表示如下：

$$\eta_f T_{life} \geq T_{exposure} \quad (6-4)$$

式中： η_f ——许用疲劳损伤率；

T_{life} ——设计疲劳寿命；

$T_{exposure}$ ——使用或荷载作用时间。

6.3.2 疲劳损伤估计是建立在米勒损伤累积法则的基础上，见4.10。

6.3.3 由S—N曲线确定的在应力范围S中失效的循环次数表示如下：

$$N = \begin{cases} \bar{a}_1 \cdot S^{-m_1} & S > S_{sw} \\ \bar{a}_2 \cdot S^{-m_2} & S \leq S_{sw} \end{cases} \quad (6-5)$$

式中： m_1, m_2 ——疲劳指数（双线性S—N曲线的反斜率，见图6.3.3）；

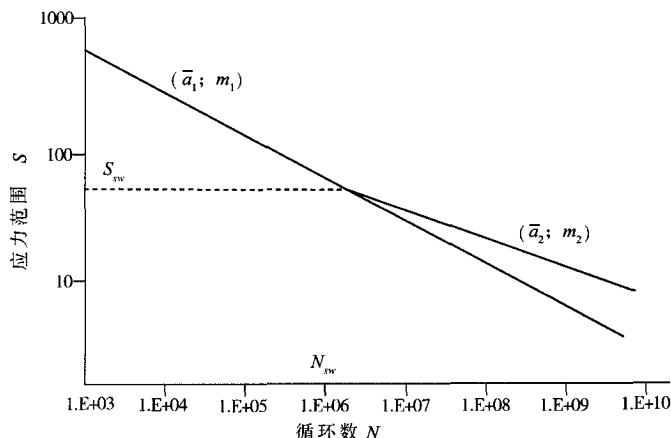


图6.3.3 双斜率S—N曲线

$\overline{a_1}, \overline{a_2}$ ——特征疲劳强度常量；

S_{sw} ——两个S—N曲线交点对应的应力，按下式计算： $S_{sw} = 10^{\left(\frac{\log \overline{a_1} - \log N_{sw}}{m_1} \right)}$ 。

图中： N_{sw} ——斜率变化处对应的循环数。

6.3.4 S—N曲线可以通过以下方法确定：

- (1) 实验室试验数据；
- (2) 普遍接受的断裂力学理论。

该S—N曲线在应用时应符合相应的材料、施工说明、初始缺陷位置和腐蚀环境。

6.3.5 疲劳寿命 T_{life} ，用公式表示：

$$T_{life} = \frac{1}{\sum \left(\frac{f_v \cdot S_i^m P_i}{\overline{a}} \right)} \quad (6-6)$$

式中： P_i ——第*i*阶振动时应力循环出现的概率；

S_i^m ——疲劳指数为*m*，管道第*i*阶振动的应力范围（2倍应力振动幅值）；

f_v ——该阶振动频率。

6.3.6 进行疲劳分析的概念同时适用于响应模型和力学模型，使用的应力范围可以用响应模型确定，也可以用力学模型确定。

(1) 响应模型是一种经验公式模型，是建立在有效实验室试验数据和一定数量全尺寸结构测试数据基础上的计算模型；

(2) 力学模型建立在Morison公式的基础上，需要有合适的公式化受力模型，且要有可靠一致的数据校核该力学模型。

6.3.7 进行疲劳分析时推荐下列方法：

- (1) 独立计算每种海况下的疲劳损伤；
- (2) 根据每种海况下的参数计算管道铺设水平面处的海流参数；
- (3) 海况通过导致管道横向流速在一定周期下波动的有效短期流定义，例如一系列规则波。不规则波会减小流速产生大波幅振动的数量，如果可以准确计算，也可在计算中考虑；
- (4) 每种海况下综合考虑长期流速分布和浪流联合作用的影响。

6.3.8 悬跨管道与流垂向和同向的整体疲劳寿命通过对所有海况（通过有效波高、峰值周期和方向描述）的影响计算，用公式表示如下：

$$T_{life}^{IL} = \left(\sum_{\theta} \sum_{H_s} \sum_{T_p} \frac{P_{H_s, T_p, \theta}}{\min(T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, IL}, T_{H_s, T_p, \theta}^{FM, IL})} \right)^{-1} \quad (6-7)$$

$$T_{life}^{CF} = \left(\sum_{\theta} \sum_{H_s} \sum_{T_p} \frac{P_{H_s, T_p, \theta}}{T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, CF}} \right)^{-1} \quad (6-8)$$

式中: $P_{H_s, T_p, \theta}$ ——每一单独海况出现的概率;

$T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, IL}$ ——单一海况下, 并综合考虑概率分布函数描述的长期流作用后, 管道抵抗与流同向涡激振动和垂流向振动导致与流同向运动的临界疲劳寿命;

$T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, CF}$ ——单一海况下, 并综合考虑概率分布函数描述的长期流作用后, 管道抵抗与流垂向涡激振动作用的临界疲劳寿命;

$T_{H_s, T_p, \theta}^{FM, IL}$ ——单一海况下, 管道抵抗直接波作用的临界疲劳寿命。

悬跨管道的疲劳寿命取与流同向疲劳寿命和与流垂向疲劳寿命两者中的最小值。

6.3.9 临界疲劳寿命 $T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, IL}$ 、 $T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, CF}$ 和 $T_{H_s, T_p, \theta}^{FM, IL}$ 通过各个海况的特征——有限波高、峰值周期和方向来评估。

6.3.10 除非另有说明, 在进行悬跨管道疲劳分析时做下列假设:

(1) 海流和波浪在管道铺设水平面处产生的流分量相互独立;

(2) 海流和波致水流是同向的, 也就是当确定两者之一的出现方向概率时, 另外一个的出现方向概率保持一致。这也是进行疲劳损伤计算最保守的做法。

6.4 极限状态 (ULS) 分析

6.4.1 进行局部屈曲强度分析时, 静力和动力弯矩、轴向力、压力都应该考虑, 荷载组合见3.2, 荷载控制条件见4.5.2。

6.4.2 在造成跨肩处产生最大变形的极端波浪条件下, 需要进行该处土壤刚度的详细分析, 自由悬跨的边界条件宜假设为铰接—铰接 (仅适用于力学模型分析)。

6.4.3 由涡激振动和 (或) 直接波浪作用导致的最大动力弯矩可通过动态应力表示:

$$M_E = \sigma_{dyn} \frac{2 \cdot I}{D_s - t} \quad (6-9)$$

式中: σ_{dyn} ——动态应力;

I ——惯性矩;

D_s ——钢管外径;

t ——钢管壁厚。

6.4.4 动态应力 σ_{dyn} 表示如下:

$$\text{与流同向} \quad \sigma_{dyn} = \frac{1}{2} \max \left\{ S_{IL}; 0.5 \cdot S_{CF} \frac{A_{IL}}{A_{CF}}; S_{FM, \max} \right\} \quad (6-10)$$

$$\text{与流垂向} \quad \sigma_{dyn} = \frac{1}{2} S_{CF} \quad (6-11)$$

式中： S_{IL} ——与流同向应力范围；

S_{CF} ——与流垂向应力范围；

$S_{FM,max}$ ——由直接波浪导致的最大应力范围；

A_{IL} ——在涡激振动作用下，与流同向管道单位变位应力幅值；

A_{CF} ——在涡激振动作用下，与流垂向管道单位变位应力幅值。

6.4.5 悬跨管道径向动态应力完全来自于涡激振动的作用，其轴向动态应力范围取以下应力的最大值：

(1) 计算重现期内，涡激振动作用下与流同向振动产生的应力范围；

(2) 涡激振动作用下，与流垂向运动产生应力的50%。

6.4.6 直接波浪作用下的最大动态应力 $\sigma_{FM,max}$ 可用设计风暴工况计算，计算公式如下：

$$\sigma_{FM,max} = k_p \cdot \sigma_s \quad (6-12)$$

式中： k_p ——峰值系数，通常保守取值为4.0；

σ_s ——波致应力幅值的标准偏差。

6.4.7 根据管道等效应力校核的简化ULS准则也可以应用，但该方法仅适用于在初步设计阶段进行管道局部屈曲校核的简化计算，不能替代最终报告中的荷载与抗力系数法（LFRD）计算。应用简化ULS准则，应该满足下列应力条件：

$$\sigma_e \leq \eta_d \times f_y \quad (6-13)$$

$$\sigma_L \leq \eta_d \times f_y \quad (6-14)$$

式中： σ_e ——等效应力，按下式计算： $\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \sigma_L + 3\tau_{th}^2}$ ；

σ_L ——纵向应力；

η_d ——使用系数，见表6.4.7；

σ_h ——环向应力，按下式计算： $\sigma_h = \Delta p_d \left(\frac{D - t_2}{2t_2} \right)$ ；

τ_{th} ——切向剪切应力。

等效应力校核的许用应力使用系数

表6.4.7

安全等级	低	一般	高
η_d	1.00	0.90	0.80

在该方法应用时所有荷载系数都等于1.00，同时相关条件荷载系数也应该根据具体应力分量给出。

6.5 安全系数

6.5.1 疲劳筛选的安全系数列表如下：

疲劳筛选安全系数 表6.5.1

γ_{IL}	1.15
γ_{CF}	1.3

6.5.2 管道抗疲劳的可靠度采用考虑失效后果的安全等级概念，使用如下格式的安全系数：

$$D_{fat} = T_{exposure} \sum \frac{f_v(\gamma_s S(\gamma_f, \gamma_k, \gamma_{on}))^m P(\bullet)}{\bar{a}} \leq \eta \quad (6-15)$$

式中： γ_f ——悬跨管道固有频率分项安全系数，见表6.5.2；

γ_{on} ——悬跨管道涡激振动激发分项安全系数，见表6.5.2；

γ_k ——悬跨管道稳定性参数分项安全系数，见表6.5.2；

γ_s ——悬跨管道应力范围分项安全系数，见表6.5.2；

P ——某阶涡激振动发生的概率。

悬跨管道疲劳分析安全系数

表6.5.2

安全系数	安全等级		
	低	一般	高
η_f	1.0	0.5	0.25
γ_s	1.05* (1.0)		
γ_f	1.20* (1.15)		
γ_k	1.30		
γ_{on}	1.10		

注：* 在管道设计阶段，如果管道悬跨的长度、和海床的间隙数据不清楚时，使用该参数值；如果进行在役海底管道的悬跨疲劳分析时，拥有实际悬跨测量数据，可应用括号内参数值。

6.5.3 悬跨管道局部屈曲强度可靠性分析（ULS准则）中确定的安全等级和第4章管道局部屈曲分析中的安全等级保持一致。

第7章 海床上的稳定性分析

7.1 通则

本章所指稳定性主要针对放置在海床上管道的位置稳定性，这与管道的水下重量、环境载荷以及海底土壤所产生的阻力密切相关。

7.2 稳定性校核准则

在进行稳定性校核时，考虑如下准则：

- (1) 横向位移；
- (2) 管壁的应力/应变；
- (3) 与由于轴力产生的横向屈曲的相互影响；
- (4) 疲劳损伤；
- (5) 涂层的磨损和失效；
- (6) 牺牲阳极块的损伤等。

通常将前两项，即横向位移和应力应变作为控制性的设计和校核准则。

7.2.1 横向位移

7.2.1.1 允许的横向位移与下列因素相关：

- (1) 管道距平台或其他约束的距离；
- (2) 海底障碍物情况；
- (3) 勘测的走廊带宽度；
- (4) 由于管道位移而可能引起的涂层或阳极块损伤程度；
- (5) 发生位移后与其他管线或海底结构物的相互作用；
- (6) 临近区域海底状况的改变；
- (7) 由于位移而可能引起的载荷状态变化等。

7.2.1.2 规定的海底横向位移不应大于铺管区勘测的走廊带宽度的一半，即管道不应移出允许的走廊带。

7.2.1.3 如果无法得到详细的资料，则管道运行状态下允许的最大横向位移可以采用：1区20m；2区0m，即一般情况下2区的管道不允许发生横向位移。但是，如果位移产生的影响能够被管道本身及其支撑结构所接受，则2区管道也可以有一定的横向位移。

7.2.1.4 对于安装状态，允许的横向位移取决于铺设和试投产之间相隔的时间，一般取5m。

7.2.2 弯曲应变

7.2.2.1 稳定性校核中，应评价由于横向位移在管道固定处所产生弯矩使管子经受的弯曲应变。

7.2.2.2 对已知的固定点，例如海底阀门等处，应评价横向位移对管道和约束结构双方的影响。

7.2.2.3 评价管道横向位移所产生的弯曲影响时，应考虑以下几点：

- (1) 过大的应变值；
- (2) 椭圆化；
- (3) 屈曲。

7.2.2.4 对如上三方面的限制准则，可参见本指南第4章的相关要求。如果得不到进一步的资料，应变限制准则可以取为： $7.5/(D/t)^2$ ，且最大应变不超过1%。

7.3 沉降和上浮

7.3.1 一般要求

7.3.1.1 对于放置在海床上的管道，需要对其可能出现的沉降进行校核。而对于埋设管道，则需同时考虑沉降和上浮的可能性。

7.3.1.2 对于气体或液体两种管道，其沉降均按照管子充满水考虑，而上浮则按管子充满气体或空气考虑。

7.3.2 沉降

在管内充水的条件下，校核管道在松软海床上或有液化倾向的海床土壤中的沉降量。假如充满水的管子比重小于土壤比重，则无需进一步分析抗沉陷的安全措施。

7.3.3 上浮

埋设管道不应上浮。在充气条件下管道比重小于覆盖土壤比重时，覆盖土壤应有足够的剪切强度和吸附力来克服管道的上浮。当覆盖土壤有可能液化时，应按照土壤液化状态的相应特性来进行校核。为了安全起见，必要时须将管道埋设在可能的液化深度以下。一般在设计阶段就应当尽量满足充气管道的比重大于土壤比重（如果要求埋设的话）。

7.4 稳定性分析方法

7.4.1 常用分析方法

7.4.1.1 管道稳定性分析常用的方法有：动力分析、广义稳定性分析以及简化的稳定性分析。分析方法的选择取决于对分析结果要求的详细程度。本指南仅对广泛应用的简化分析方法给出具体公式，其他的可以参考相关文献。

7.4.1.2 动力分析一般是对波浪和海流作用下的一段管道进行完整的动态模拟，完全的动力分析仅在特定的情况下使用。模拟一般包括土壤阻力模型、水动力、边界条件和动力响应。动力分析是广义方法的参考基础。

7.4.1.3 广义稳定性分析方法是建立在对动力分析结果进行归纳的基础上，这一分析方法通过利用一组无量纲参数和特殊的端部条件来实现。该方法可以在对可能发生的位移和应变较为敏感的管段使用。

7.4.1.4 简化的稳定性分析是根据管道上作用力的准静态平衡，并已被广义稳定性分析的结果所校准。一般来说，该方法给出的管子重量形成了由广义稳定性分析所得管重的保守的包络线，该方法可用于绝大多数把管道水下重量作为唯一关心参数的稳定性计算。

7.4.2 简化的稳定性分析方法

7.4.2.1 分析公式

该方法是一种准静态方法，其计算公式由式（7-1）给出：

$$\alpha (F_D + F_I) \leq (W_s - F_L) \mu \quad (7-1)$$

式中： α ——安全系数，通常不小于1.1；

W_s ——单位长度管子水下重量；

μ ——土壤摩擦系数；

F_L ——单位长度管子所受到的水动力升力；

F_D ——单位长度管子所受到的水动力阻力；

F_I ——单位长度管子所受到的水动力惯性力。

因此，保证管道稳定所需的最小管重可以由式（7-2）给出：

$$W_s = \left[\frac{\alpha (F_D + F_I) + \mu F_L}{\mu} \right] \quad (7-2)$$

其中相关的水动力可以按下式估算：

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_L \cdot (U_s \cdot \cos \theta + U_c)^2 \\ F_D &= \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_D \cdot |(U_s \cdot \cos \theta + U_c)| (U_s \cdot \cos \theta + U_c) \\ F_I &= \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho_w \cdot C_M \cdot A_s \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (7-3)$$

式中： ρ_w ——水的密度；

D ——管子的总外径；

C_L ——升力系数，一般取0.9；

C_D ——阻力系数，一般取0.7；

C_M ——惯性力系数，一般取3.29；

U_s ——靠近海底垂直于管道的有效速度幅值；

U_c ——垂直于管道的平均流速；

A_s ——垂直于管道的有效加速度（ $A_s=2\pi U_s/T_U$ ）；

θ ——波浪周期中的水动力相位角。

7.4.2.2 有效速度 U_s 、垂直于管道的平均流速 U_c 和上跨零周期 T_U 的确定

式（7-3）中， U_s 为考虑折减系数的有效速度，不考虑折减的有效速度记为 U_s^* ，则有：

$$U_s = U_s^* R \quad (7-4)$$

式中 R 是由于波浪的方向性及散布性所产生的折减系数，可保守地取为1.0。

平均流速 U_c 与已知的在海底以上某一高度 z_r 处的参考稳态流速 U_r 之间的比值可按下式计算：

$$\frac{U_c}{U_r} = \frac{1}{\ln(z_r/z_0 + 1)} \left[(1 + z_0/D) \ln(D/z_0 + 1) - 1 \right] \quad (7-5)$$

U_s^* 和上跨零周期 T_U ，分别按如下的曲线来确定。图中各参数含义如下：

d_1 ——水深；

g ——重力加速度；

T_p ——谱峰周期；

H_s ——有效波高；

γ ——Jonswap谱的峰度参数。

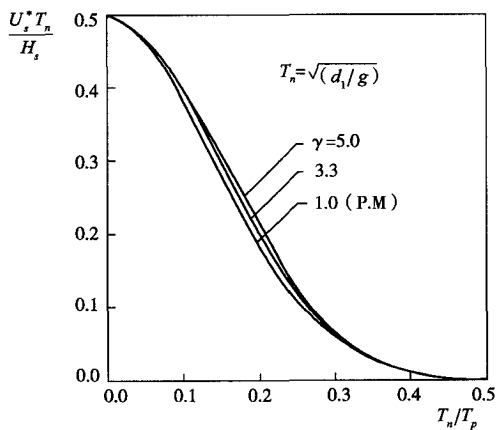


图7.4.2.2 (1) 有效水质点速度 U_s^*

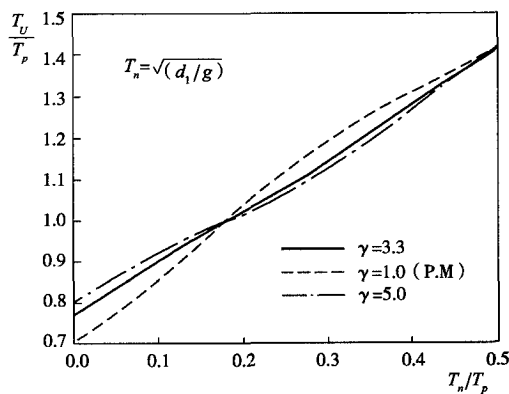


图7.4.2.2 (2) 上跨零周期 T_U

第8章 腐蚀管道的强度评估

8.1 通则

8.1.1 适用范围

本章基于载荷抗力系数法（LRFD方法），给出了对含有腐蚀的管道进行评估的常用做法,其中特别考虑了缺陷深度尺寸确定和材料性质的不确定因素。适用于评估的缺陷类型包括：

- （1）单个缺陷，指一个与临近缺陷不存在相互作用的缺陷；
- （2）相互作用缺陷，指与相邻缺陷在轴向或环向存在相互作用的缺陷，由于有相邻缺陷的影响，相互作用缺陷的失效压力比单个缺陷的要低；
- （3）复杂形状缺陷，指由相互作用的缺陷或单个缺陷联合群体组成的缺陷，评估的前提是其剖面形状可以得到。

8.1.2 载荷类型

本章做法主要用于经受下列载荷的腐蚀缺陷的评估：

- （1）只有内压载荷；
- （2）内压载荷和纵向压应力联合作用。

其中纵向压应力可能是由于轴向载荷、弯曲载荷、温度载荷等引起的。由于外压的存在会使管道许用压力提高，因此本章所描述的只有内压载荷的状态将给出偏于保守的评估结果。另外，在只有外压存在的情况下（含外压大于内压的情况），尚应按照4.5.2.3做压溃校核，此时可以保守地取腐蚀后的最小壁厚。

8.1.3 进一步的评估

对于腐蚀管道，本章只是提供了一个简便的评估方法，其分析结果偏于保守。如果使用本指南给出的评估结果是不可接受的，业主可以考虑选择更为精确的方法来评估受腐蚀管道的剩余强度，比如详细的有限元分析、全尺寸模型试验等。

8.2 评估流程

按本章的方法进行腐蚀管道的强度评估，基本的流程如图8.2所示。

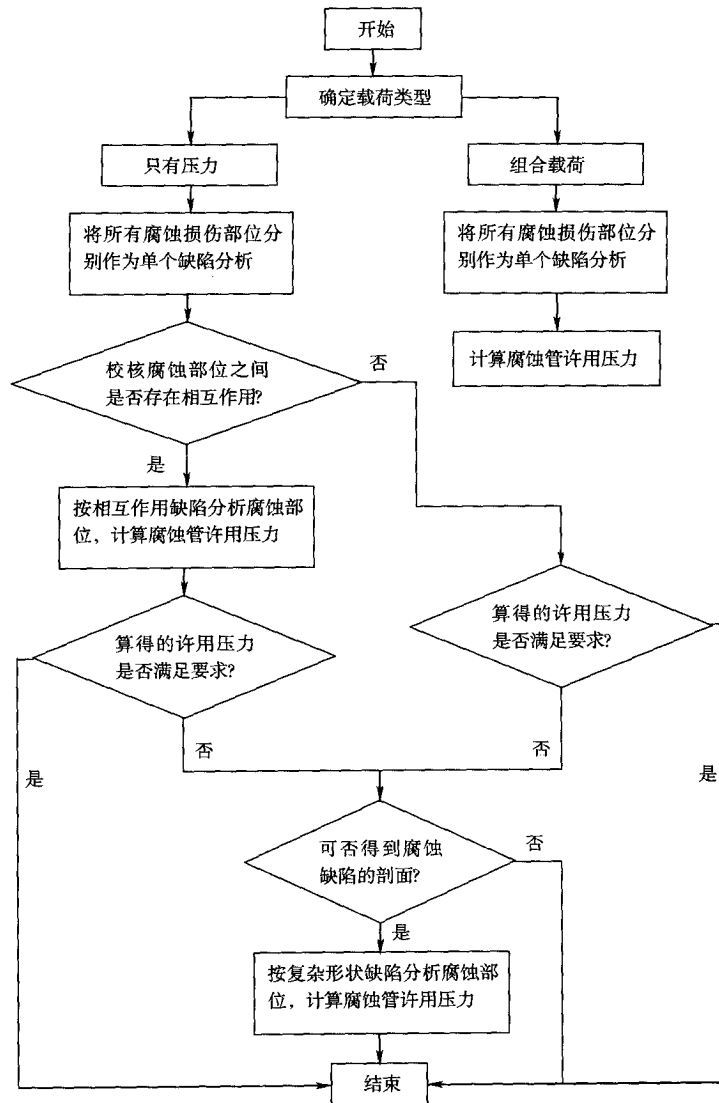


图8.2 腐蚀管道评估的流程图

8.3 分项安全系数

8.3.1 可靠度水平

分项安全系数和相应的分位数值考虑了压力、材质、管子制造过程的质量和误差、腐蚀缺陷测量的精度等不确定性因素，并被定义为三个可靠度水平。安全等级和相应的目标年度失效概率的关系如第1章表1.4.6所示。

8.3.2 检测尺寸精度

通常检测尺寸的精度只给出了相对于管壁厚度的值和一个相应的置信度。置信度

环向腐蚀纵向分项安全系数 η

表8.3.6 (2)

是否指定材料附加要求	安全等级		
	低	一般	高
否	0.96	0.87	0.77
是	1.00	0.90	0.80

8.3.7 纵向应力使用系数

纵向应力使用系数如下表所示。

纵向应力使用系数 ξ

表8.3.7

安全等级	使用系数
低	0.90
一般	0.85
高	0.80

8.4 单个腐蚀缺陷的评估

本指南中所述的单个缺陷，是指相邻缺陷满足如下任一要求的缺陷：

$$(1) \text{ 相邻缺陷的环向角 } \phi (^{\circ}) : \phi > 360 \sqrt{\frac{t}{D}}$$

$$(2) \text{ 相邻缺陷的纵向间距 } s : s > 2.0 \sqrt{Dt}$$

8.4.1 只有内压载荷的纵向腐蚀缺陷评估

单个腐蚀缺陷的管道的许用压力 p_{corr} 由以下公式给出。需要注意的是：当缺陷的环向长度超过纵向长度时该公式将不再适用，此时需按照4.4做承压控制校核（保守地取腐蚀后的最小壁厚）。

$$p_{corr} = \gamma_m \frac{2t \cdot SMTS}{(D-t)} \cdot \frac{[1 - \gamma_d(d/t)^*]}{[1 - \frac{\gamma_d(d/t)^*}{Q}]} \quad (8-1)$$

$$\text{式中: } Q = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{l}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$$

$$(d/t)^* = (d/t)_{meas} + \varepsilon_d StD[d/t]$$

其中 l 为腐蚀区域的纵向长度。式 (8-1) 中，如果 $\gamma_d(d/t)^* \geq 1$ ，则取 $p_{corr} = 0$ ，另

外, p_{corr} 的值不允许超过最大许用操作压力 p_{mao} 。如果测量的缺陷深度超过85%是不可接受的。

8.4.2 内压和纵向压应力叠加作用的纵向腐蚀缺陷评估

受内压和纵向压应力作用的纵向单个腐蚀缺陷的许用压力 $p_{corr,comp}$ 可用下述步骤进行估算。

(1) 确定在腐蚀缺陷的位置由于外部载荷(如作用在管子上的轴向、弯曲以及温度载荷)而产生的纵向应力,并根据管子的名义壁厚计算缺陷处的名义纵向弹性应力,如:

$$\sigma_A = \frac{F_X}{\pi(D-t)t}$$

$$\sigma_B = \frac{4M_Y}{\pi(D-t)^2 t}$$

则组合的名义纵向应力 σ_L 为:

$$\sigma_L = \sigma_A + \sigma_B$$

(2) 如果组合的纵向应力为压应力,则计算腐蚀管道许用压力,包括校正纵向压应力的影响。

$$p_{corr,comp} = \gamma_m \frac{2t \cdot SMTS}{(D-t)} \cdot \frac{[1 - \gamma_d(d/t)^*]}{[1 - \frac{\gamma_d(d/t)^*}{Q}]} H_1 \quad (8-2)$$

式中:

$$H_1 = \frac{1 + \frac{\sigma_L}{\xi \cdot SMTS} \frac{1}{A_r}}{1 - \frac{\gamma_m}{2\xi A_r} \frac{[1 - \gamma_d(d/t)^*]}{[1 - \frac{\gamma_d(d/t)^*}{Q}]}}$$

$$A_r = \left(1 - \frac{d}{t} \theta\right)$$

其中 θ 为腐蚀区域环向长度与管子名义外周长比率。 $p_{corr,comp}$ 不允许超过 p_{corr} 。

8.4.3 内压和纵向压应力叠加作用的环向腐蚀缺陷评估

8.4.3.1 单个环向腐蚀缺陷的腐蚀管道许用压力 $p_{corr,circ}$ 可用下述步骤进行估算:

- (1) 确定由于外部载荷作用而产生的纵向应力,与8.4.2(1)中的步骤相同;
- (2) 如果组合的纵向应力为压应力,则计算腐蚀管道许用压力,包括校正纵向压应力的影响。

$$p_{corr,circ} = \min \left\{ \gamma_{mc} \frac{2t \cdot SMTS}{(D-t)} \cdot \left[\frac{1 + \frac{\sigma_L}{\xi \cdot SMTS} \frac{1}{A_r}}{1 - \frac{\gamma_{mc}}{2\xi} \frac{1}{A_r}} \right], \gamma_{mc} \frac{2t \cdot SMTS}{(D-t)} \right\} \quad (8-3)$$

其中 $A_r = \left(1 - \frac{d}{t} \theta\right)$, $p_{corr,circ}$ 的值不允许超过最大许用操作压力 p_{mao} 。

8.4.3.2 对于整个环向都有腐蚀并且缺陷的纵向长度超过 $1.5t$ 的情况下, 上面的评估公式将不再适用。

8.5 相互作用腐蚀缺陷的评估

8.5.1 所需资料

严格地讲, 本节所描述的评估方法仅适用于经受内压载荷的缺陷。需要的资料包括:

- (1) 每个缺陷绕管子环向的角度位置;
- (2) 相邻缺陷之间的纵向间距;
- (3) 缺陷是在外表面还是在内表面;
- (4) 每个独立缺陷的长度、深度和宽度。

8.5.2 腐蚀管许用压力估算

8.5.2.1 基本原则

(1) 在相互作用的缺陷群内, 为了确定最小的预期失效压力, 要考虑所有的单个缺陷以及所有相邻缺陷组合;

(2) 用总长度和有效深度, 使用单个缺陷公式评估组合的缺陷。

8.5.2.2 评估步骤

相互作用缺陷群的腐蚀管许用压力可以用以下的程序进行估算:

(1) 对于有基底金属损失的区域, 可以使用该处管子壁厚和缺陷的深度, 如图 8.5.2.2 (1) 所示:

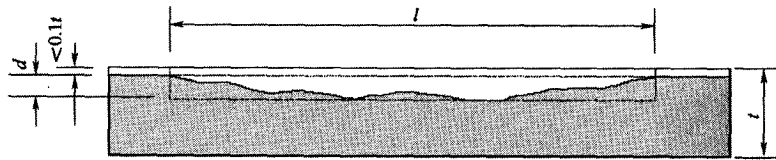


图8.5.2.2 (1) 具有基底腐蚀的金属腐蚀缺陷修正

(2) 将管道被腐蚀的部位分成许多段, 每段的最小长度为 $5.0\sqrt{Dt}$, 并且需要保证段与段之间有一个最小 $2.5\sqrt{Dt}$ 的重叠。重复下述步骤 (3) 至 (11) 来评估每段长

度所有可能的相互作用。

(3) 考虑缺陷的环向相互作用：以下述环向角构成一系列纵向投影线：

$$Z = 360 \sqrt{\frac{t}{D}}。$$

(4) 依次考虑每条投影线。环向角在 $\pm Z$ 之内的缺陷，均投影到同一投影线上，如图8.5.2.2 (2) 所示：

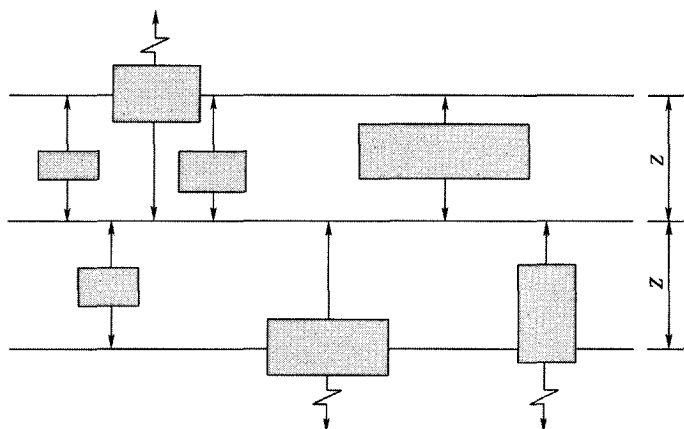


图8.5.2.2 (2) 环向相互作用缺陷的投影示意

(5) 在缺陷重叠的部分，它们应组合成一个复合缺陷来考虑，以组合的长度和最深缺陷的深度为准，见图8.5.2.2 (3)。如果这个复合缺陷是由管内壁和外壁缺陷叠加形成的，则此组合缺陷的深度取内外缺陷最大深度之和，见图8.5.2.2 (4)。

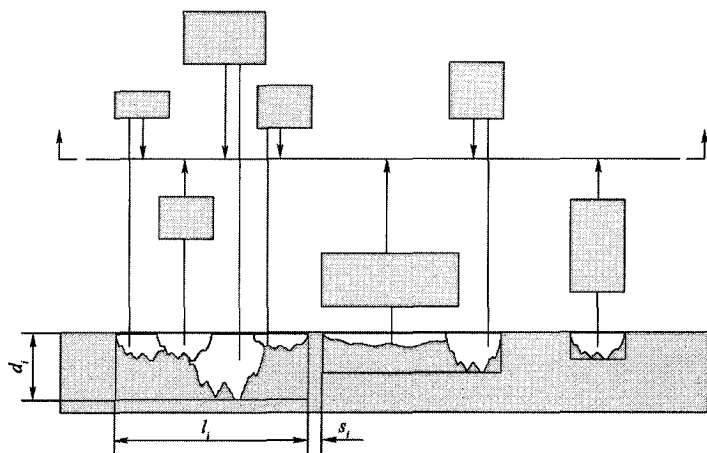


图8.5.2.2 (3) 重叠部位形成复合缺陷

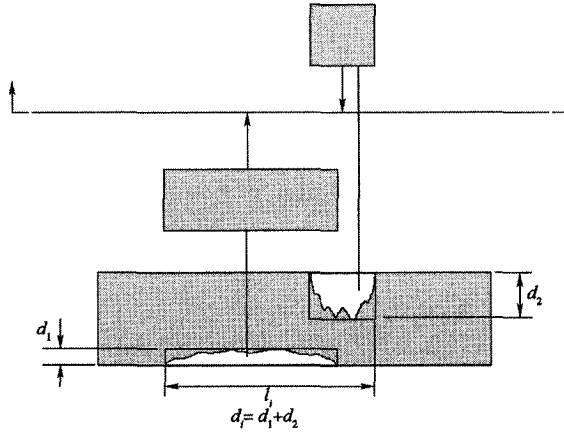


图8.5.2.2 (4) 内外缺陷组合成复合缺陷

(6) 计算每个复合缺陷的腐蚀管许用应力 ($p_1, p_2 \cdots p_N$)，对每个复合缺陷按单个缺陷处理：

$$p_i = \gamma_m \frac{2t \cdot SMTS}{(D-t)} \cdot \frac{[1 - \gamma_d (d_i/t)^*]}{[1 - \frac{\gamma_d (d_i/t)^*}{Q_i}]} \quad (i=1 \cdots N) \quad (8-4)$$

式中：

$$Q_i = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{l_i}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$$

$$(d_i/t)^* = (d_i/t)_{meas} + \varepsilon_d StD[d/t]$$

如果 $\gamma_d (d_i/t)^* \geq 1$ ，则取 $p_i = 0$ 。

下面步骤(7)至(8)主要是估算相邻缺陷所有组合的管子的许用压力。组合缺陷 nm （定义为由单个缺陷 n 至单个缺陷 m ，这里 $n=1 \cdots N, m=n \cdots N$ ）的腐蚀管道许用压力用 p_{nm} 表示。

(7) 计算相邻缺陷所有组合的组合长度，见图8.5.2.2(5)。缺陷 $n \sim m$ 的总长度 l_{nm} 和有效深度 d_{nm} 由下式给出：

$$l_{nm} = l_m + \sum_{i=n}^{i=m-1} (l_i + s_i) \quad (n, m=1 \cdots N)$$

$$d_{nm} = \frac{\sum_{i=n}^{i=m} d_i l_i}{l_{nm}} \quad (8-5)$$

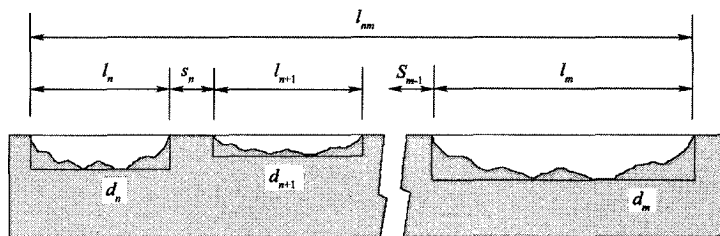


图8.5.2.2 (5) 相互作用缺陷组合

(8) 利用单个缺陷公式用 l_{nm} 和 d_{nm} 计算从 $n \sim m$ 的组合缺陷的腐蚀管道许用压力 p_{nm} 。

(9) 对当前投影线的腐蚀管许用压力按该投影线上所有单个缺陷 ($p_1 \sim p_N$) 和所有单个缺陷组合的最小失效压力 (p_{nm}) 来取值:

$$p_{corr} = \min(p_1, p_2 \cdots p_N, p_{nm})$$

(10) 按上述步骤(4)至(9)对每个环向投影线的腐蚀管许用压力进行计算, 取其最小值作为该管段的腐蚀管许用压力。

(11) 对下一腐蚀段重复步骤(3)至(10), 以得到所要评估腐蚀管道的许用压力值。

8.6 复杂形状腐蚀缺陷的评估

与上节中相互作用缺陷的评估方法一样, 本节所述内容也只适用于仅经受内压载荷的缺陷。

8.6.1 所需资料

(1) 复杂形状缺陷的长度和深度剖面图。其长度必须是沿管子轴向的长度, 沿轴向某长度处的缺陷深度应取该长度处沿环向的最大深度;

(2) 剖面长度必须包括所要评估的复杂形状缺陷首尾之间的所有材料。

8.6.2 腐蚀管许用应力估算

本节所述复杂形状缺陷的评估方法是建立在单个腐蚀缺陷和相互作用腐蚀缺陷评估基础上的, 因此这里不再给出具体的公式, 只描述基本原理和主要步骤。

(1) 复杂形状缺陷评估的基本原理是确定此缺陷是否具有单个不规则“腐蚀斑”的特性, 以及“腐蚀斑”中的“点腐蚀”控制是否失效, 同时也要评估点腐蚀之间的相互作用。

(2) 将腐蚀深度分为若干等份, 并逐次进行深度递增分析。

(3) 在每个深度处, 通过许多含有理想“点腐蚀”的“腐蚀斑”将缺陷模型化。腐蚀斑定义为比当前深度浅的所有材料损失区域, 而点腐蚀则定义为比当前深度要深的腐蚀区域, 见图8.6.2。图中 d_j 代表当前深度, A_{patch} 和 A_{pit} 分别代表腐蚀斑区域和理想

点腐蚀区域。点腐蚀的腐蚀管道许用压力是通过按壁厚减薄的等效管来估算的，等效管的承载能力等于腐蚀斑的承载能力。

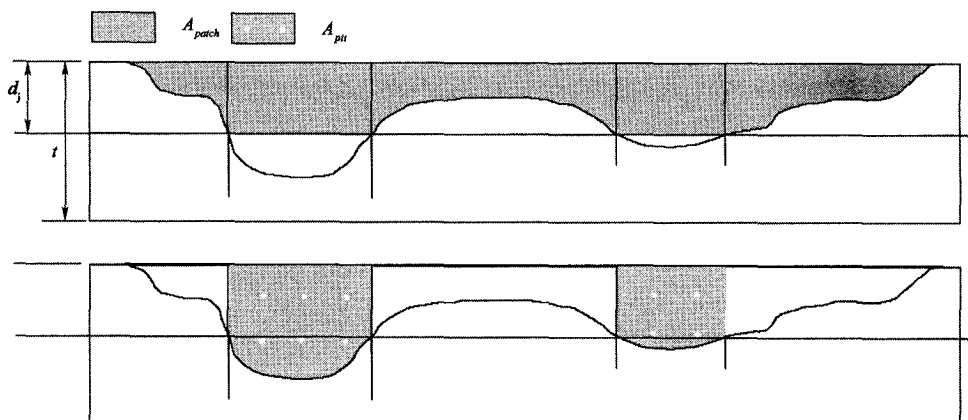


图8.6.2 将复杂形状缺陷模型化为“腐蚀斑”和理想“点腐蚀”

- (4) 使用相互作用缺陷的评估方法来评估等效管上的理想点腐蚀。
- (5) 在当前深度处估算的腐蚀管许用压力取下列值中的最小值：腐蚀斑、理想点腐蚀、以及基于腐蚀总长度和平均深度算得的腐蚀管许用压力。
- (6) 对所有深度重复上述过程以确定最小的腐蚀管道许用压力，此最小值即为复杂形状缺陷腐蚀管道的许用压力。