



T/CECS XXX- 202X

中国工程建设标准化协会标准

海洋工程钢管混凝土结构技术规程
(拟更名：中空夹层复合海底管道结构技术规程)

Technical specification for steel-concrete double skin composite tubular
structures

(征求意见稿)

中国 XX 出版社

中国工程建设标准化协会标准

海洋工程钢管混凝土结构技术规程
(拟更名：中空夹层复合海底管道结构技术规程)

Technical specification for steel-concrete double skin composite tubular
structures

T/CECS XXX—202X

主编单位：XXXX

XXXX

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年XX月x日

中国 XX 出版社

202X 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2021 年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2021〕11 号）的要求，规程编制组经深入系统的科学研究，认真总结实践经验，采纳最新的理论和试验研究成果，参考有关国内标准和国外先进标准，并在广泛征求意见基础上，制定本规程。

本规程共分为 8 章和 4 个附录，主要技术内容包括：总则，术语和符号，基本规定，材料，结构分析，管道承载力计算，防护设计，制造、安装和验收等。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑产业化分会归口管理，由清华大学负责具体技术内容的解释。本规程在使用过程中如有需要修改和补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：北京市海淀区清华大学何善衡楼；邮政编码：100084），以供修订时参考。

主编单位：

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1	总则.....	7
2	术语和符号.....	8
	2.1 术语	8
	2.2 符号	8
3	基本规定.....	12
	3.1 一般规定	12
	3.2 作用与作用组合	13
	3.3 构造规定	14
	3.4 连接	14
4	材料.....	15
	4.1 钢材	15
	4.2 夹层材料	15
	4.3 连接材料	16
5	结构分析.....	18
	5.1 一般规定	18
	5.2 计算指标	18
	5.3 分析方法	20
6	管道承载力计算.....	21
	6.1 一般规定	21
	6.2 压（拉）、弯、扭复合受力承载力计算	21
	6.3 长期荷载作用下的承载力计算	28
	6.4 抗疲劳设计	28
7	防护设计.....	30
	7.1 防腐蚀设计	30
	7.2 抗低温设计	30
	7.3 抗撞击设计	30

7.4	抗爆炸设计	31
8	制造、安装和验收.....	33
8.1	一般规定	33
8.2	制造	33
8.3	安装	33
8.4	验收	34
附录 A	钢与混凝土的界面粘结强度测试	35
附录 B	复合管道夹层材料长期性能测试	36
附录 C	复合管道结构疲劳性能测试	37
附录 D	力和腐蚀共同作用下钢管材料性能测试.....	38
	本规程用词说明.....	39
	引用标准名录.....	40
附：	条文说明.....	41

Contents

1	General provisions	7
2	Terms and symbols.....	8
2.1	Terms	8
2.2	Symbols	8
3	Basic requirements.....	12
3.1	General requiements	12
3.2	Actions and combination of actions	13
3.3	Detailing requiements.....	14
3.4	Connection.....	14
4	Material	15
4.1	Steel	15
4.2	Sandwiched material	15
4.3	Connection material.....	16
5	Structural analysis	18
5.1	General requiements	18
5.2	Design indices	18
5.3	Analysis methods.....	20
6	Design of composite tubular structures.....	21
6.1	General requiements.....	21
6.2	Resistance of structures under compression (tension), bending and torsion.....	21
6.3	Resistance of structures under long-term loading	28
6.4	Fatigur resistance design	28
7	Protective design.....	30
7.1	Design of corrosion resistance.....	30
7.2	Design of frost resistance	30
7.3	Design of impact resistance.....	30

7.4	Design of blast resistance	31
8	Fabrication, installation and acceptance	33
8.1	General requirements	33
8.2	Fabrication	33
8.3	Installation	33
8.4	Acceptance	34
Appendix A	Bond strength test of steel-concrete interface.....	35
Appendix B	Test of long-term properties of sandwiched material	36
Appendix C	Fatigue test of composite tubular structures	37
Appendix D	Test of the combined effect of loading and corrosion on steel tubes	38
	Explanation of wording in this specification	39
	List of quoted standards	40
	Addition: Explanation of provisions	41

1 总 则

1.0.1 为了规范中空夹层复合海底管道结构的技术要求，使结构的设计、制造、安装和验收做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量和耐久性，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于海洋工程中空夹层复合海底管道结构的设计、制造、安装和验收。

1.0.3 中空夹层复合海底管道结构的设计、制造、安装和验收除应符合本规程外，尚应符合国家及行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 中空夹层复合海底管道 steel-concrete double skin composite tube

由内、外两个截面形心重合的圆形钢管组成，并在钢管夹层中浇筑混凝土或其他材料且共同受力的海底管道。

2.1.2 中空夹层复合海底管道结构 steel-concrete double skin composite tubular structures

由中空夹层复合海底管道作为主要受力结构的结构形式。

2.1.3 截面空心率 cross-sectional hollow ratio

中空夹层复合海底管道内钢管外直径与外钢管内直径的比值。

2.1.4 名义截面含钢率 nominal cross-sectional steel ratio

中空夹层复合海底管道外层钢管横截面面积与其内壁所围横截面面积的比值。

2.1.5 名义约束效应系数 nominal confinement factor

反映中空夹层复合海底管道组合截面几何特征和组成材料物理特性的综合参数。

2.1.6 轴压比 axial compression ratio of the member

轴心受压的中空夹层复合海底管道轴心压力设计值与轴心受压承载力的比值。

2.2 符号

2.2.1 作用、作用效应和抗力

M ——弯矩设计值；

M_u ——受弯承载力；

N ——轴力设计值；

$N_{b,u}$ ——剩余截面受压承载力；

N_t ——轴向拉力设计值；

$N_{t,u}$ ——轴心受拉承载力；

N_u ——截面受压承载力；

N_{uL} ——长期荷载作用下轴心受压承载力；

T ——扭矩设计值；

T_u ——抗扭承载力。

2.2.2 材料力学性能

E_s ——钢材的弹性模量；

E_c ——夹层材料的弹性模量；

E_i' ——内钢管钢材的硬化模量；

E_o ——外钢管钢材的弹性模量；

E_o' ——外钢管钢材的硬化模量；

f_b ——钢管和夹层材料粘结强度设计值；

f_{osc} ——外钢管和夹层材料的截面轴压强度设计值；

f_{oscy} ——外钢管和夹层材料的截面轴压强度标准值；

f_i ——内钢管钢材的抗拉和抗压强度设计值；

f_o ——外钢管钢材的抗拉和抗压强度设计值；

f_{yi} ——内钢管钢材的屈服强度；

f_{yo} ——外钢管钢材的屈服强度；

f_c ——夹层材料的轴心抗压强度设计值；

f_{ck} ——夹层材料的轴心抗压强度标准值；

f_{yc} ——夹层材料的屈服强度；

ν_o ——外钢管钢材的泊松比；

τ_{scy} ——外钢管和夹层材料截面的抗扭极限强度；

τ_{vi} ——内钢管抗扭极限强度。

2.2.3 几何参数

A_c ——夹层材料的横截面面积；

A_{ce} ——外层钢管内壁所围的横截面面积；

A_{si} ——内钢管的钢横截面面积；

A_{so} ——外钢管的钢横截面面积；

D ——钢管外径；

D_c ——夹层材料外径；

D_i ——内钢管外径；

D_o ——外钢管外径；
 I_c ——夹层材料的截面惯性矩；
 I_{si} ——内钢管的截面惯性矩；
 I_{so} ——外钢管的截面惯性矩；
 l_0 ——管道的计算长度；
 t ——钢管壁厚；
 t_c ——夹层材料壁厚；
 t_i ——内钢管壁厚；
 t_o ——外钢管壁厚；
 λ ——管道的长细比；
 λ_o ——管道弹塑性失稳的界限长细比；
 λ_p ——管道弹性失稳的界限长细比。

2.2.4 计算系数及其他

A ——落物在下落方向的投影面积；
 a ——夹层材料刚度折减系数；
 C_a ——落物的附加质量系数；
 C_D ——落物的阻力系数；
 E_A ——落物的附加水动力能量；
 E_E ——有效撞击能量；
 E_T ——落物动能；
 g ——重力加速度；
 k_{cr} ——长期荷载影响系数；
 m ——落物质量；
 m_a ——落物的附加水动力质量；
 P_a ——静水压压强；
 p ——气泡诱导压力荷载压强；
 p_c ——压溃强度；
 p_b ——破裂压力；
 p_e ——外部压力；

p_{EI} ——弹性屈曲压力；
 p_i ——内部压力；
 p_{min} ——管道能经受的最小压力；
 p_{PI} ——塑性屈曲压力；
 p_p ——单钢管的压溃传播压力；
 p_{sp} ——中空夹层复合海底管道结构的压溃传播压力；
 R_a ——钢管表面粗糙度；
 R_b ——水下爆炸中心点到中空夹层复合海底管道结构迎爆表面的直线距离；
 V ——落物体积；
 v_T ——落物稳定下落速度；
 W_b ——水下爆炸等效 TNT 装药量；
 Z_b ——水下爆炸的比例爆距；
 α ——截面含钢率；
 α_c ——流动应力参数；
 α_n ——名义截面含钢率；
 α_p ——用于组合荷载准则的压力因子；
 γ_m ——材料抗力因子；
 γ_{m1} ——外钢管与夹层材料的截面抗弯承载力系数；
 γ_{m2} ——内钢管的截面抗弯承载力系数；
 γ_{SC} ——安全等级抗力因子；
 γ_t ——抗扭承载力计算系数；
 κ ——钢管与夹层混凝土之间的粘结强度折减系数；
 ξ ——名义约束效应系数；
 ξ_o ——名义约束效应系数设计指标；
 ρ_w ——水的密度；
 φ ——管道结构轴心受压的稳定系数；
 χ ——截面空心率；
 ψ_b ——爆炸作用后中空夹层复合海底管道结构损伤指数。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 中空夹层复合海底管道结构设计应包括下列内容：

- 1 结构方案设计，包括结构选型、结构布置；
- 2 材料选用及截面选择；
- 3 作用及作用效应分析；
- 4 结构的极限状态验算；
- 5 结构及连接的构造；
- 6 制造、安装、防腐等要求。

3.1.2 本规程采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用分项系数设计表达式进行设计。

3.1.3 中空夹层复合海底管道结构应进行承载能力极限状态设计，且除偶然设计状况外，应进行正常使用极限状态设计，并应符合下列规定：

- 1 进行承载能力极限状态设计时，应采用作用的基本组合或偶然组合；
- 2 进行正常使用极限状态设计时，应采用作用的标准组合、频遇组合或准永久组合。

3.1.4 中空夹层复合海底管道结构的安全等级和设计工作年限应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 和《工程结构通用规范》GB 55001 的有关规定。中空夹层复合海底管道结构的安全等级，不应低于整体工程结构的安全等级。

3.1.5 进行中空夹层复合海底管道结构设计时，应合理选择材料、结构方案和构造措施，满足结构构件在制造、安装和使用过程中的强度、刚度和稳定性要求，并应符合防腐、抗冲击等要求。

3.1.6 中空夹层复合海底管道结构应结合制造及安装技术与实际工程条件，选择合理制造工艺和安装方法，并制定技术要求。

3.2 作用与作用组合

3.2.1 中空夹层复合海底管道结构荷载标准值、荷载组合的分项系数、组合值系数的确定应根据工程类别，符合国家现行有关标准的规定。直接承受动力荷载的中空夹层复合海底管道结构，计算构件强度、稳定性以及连接强度、疲劳时，动力荷载代表值应乘以动力系数。

3.2.2 进行中空夹层复合海底管道结构的强度以及稳定性验算时，应采用荷载设计值；进行中空夹层复合海底管道结构的疲劳验算时，应采用荷载标准值。

3.2.3 在中空夹层复合海底管道结构的设计与制造过程中，应考虑影响该结构的海洋环境条件因素。

3.2.4 进行中空夹层复合海底管道结构设计时，应采用相关重现期最危险的荷载效应组合。当不同的荷载分量（如风荷载、波浪荷载、海流荷载、冰荷载或地震作用）之间的相互关系未知时，可使用表 3.2.4 中的特征组合环境荷载。

表 3.2.4 根据重现期的特征环境荷载组合

风荷载	波浪荷载	海流荷载	冰荷载	地震作用
永久条件				
100 年	100 年	10 年		
10 年	10 年	100 年		
10 年	10 年	10 年	100 年	
10 年	10 年	10 年		100 年
临时条件				
10 年	10 年	1 年		
1 年	1 年	10 年		
1 年	1 年	1 年	10 年	
1 年	1 年	1 年		10 年

3.3 构造规定

3.3.1 中空夹层复合海底管道的截面外层钢管外径不宜小于 304.8 mm (12inch)，且不宜大于 1524 mm (60inch)，截面内层及外层钢管壁厚不宜小于 4 mm，当夹层材料采用混凝土时，其最大骨料粒径不宜大于内层及外层钢管间净间距的 1/3，外层钢管与内层钢管间的最小净间距不宜小于 30 mm。外层钢管与内层钢管的径厚比限值应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017、《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 和《石油天然气工业管线输送系统用钢管》GB/T 9711 的相关要求。

3.3.2 名义截面含钢率不宜小于 0.06，且不宜大于 0.20。截面空心率不应小于 0.25，且不应大于 0.75。对于有抗冲击需求的中空夹层复合海底管道结构，截面空心率不应大于 0.7。名义截面含钢率应按下列式计算：

$$\alpha_n = \frac{A_{so}}{A_{ce}} \quad (3.3.2)$$

式中： α_n ——名义截面含钢率；

A_{so} ——截面外层钢管的横截面面积 (mm²)；

A_{ce} ——外层钢管内壁所围的横截面面积 (mm²)。

3.3.3 名义约束效应系数不宜小于 0.6，且不应大于 4.0。名义约束效应系数应按下列式计算：

$$\xi = \frac{A_{so} f_{yo}}{A_{ce} f_{ck}} \quad (3.3.3)$$

式中： ξ ——名义约束效应系数；

f_{ck} ——夹层材料的轴心抗压强度标准值 (N/mm²)；

f_{yo} ——外钢管钢材的屈服强度 (N/mm²)。

3.4 连接

3.4.1 中空夹层复合海底管道结构的连接应确保力的有效传递，应保证内、外钢管与夹层材料共同工作，并满足强度、刚度和稳定性的要求；还应保证易于制作、运输和安装，夹层填充料易于浇筑。

3.4.2 中空夹层复合海底管道结构的连接构造应做到构造简洁、传力明确。

4 材 料

4.1 钢材

4.1.1 中空夹层复合海底管道结构中的外层及内层钢管采用普通结构钢时宜采用 X60、X65、X70 钢，且钢管质量应符合国家现行标准《石油天然气工业管线输送系统用钢管》GB/T 9711、《海底管道系统》SY/T 10037 的相关规定、《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591。

4.1.2 中空夹层复合海底管道结构中的内层钢管采用不锈钢材料时，应符合国家现行标准《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》GB/T 20878、《不锈钢热轧钢板和钢带》GB/T 4237、《不锈钢冷轧钢板和钢带》GB/T 3280、《建筑用不锈钢焊接管材》JG/T 539、《不锈钢管混凝土结构技术规程》T/CECS 952 和《不锈钢结构技术规范》CECS 410 的有关规定。不锈钢宜采用奥氏体型、铁素体型和奥氏体-铁素体双相型不锈钢，不锈钢选用宜符合下列规定：

- 1 当采用奥氏体型不锈钢时，可选用统一数字代号为 S30408、S30403、S31608、S31603 的不锈钢；
- 2 当采用奥氏体-铁素体双相型不锈钢时，可选用统一数字代号为 S22053 和 S22253 的不锈钢；
- 3 当有可靠依据时，亦可采用其他牌号的不锈钢。

4.1.3 中空夹层复合海底管道结构中钢管的强度设计值和其他物理性能指标，应按国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017、《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446、《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591、《不锈钢结构技术规程》CECS 410 和《不锈钢管混凝土结构技术规程》T/CECS 952 的有关规定执行。

4.2 夹层材料

4.2.1 中空夹层复合海底管道结构中的夹层材料可采用普通混凝土、高强混凝土、轻骨料混凝土、保温混凝土、砂浆、高密度聚乙烯等，当采用混凝土材料时，其质量应

符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107 的有关规定，并应符合下列规定：

- 1 夹层混凝土的水胶比不宜大于 0.45；
- 2 夹层混凝土的强度等级不应低于 C40；
- 3 带有外包钢筋混凝土配重层的中空夹层复合海底管道结构，其夹层混凝土的强度等级不应低于外层钢管外包混凝土的强度等级。

4.2.2 当外层钢管采用普通结构钢、夹层材料采用混凝土时，夹层混凝土强度等级的确定应符合表 4.2.2 的规定。

表 4.2.2 不同强度等级的普通结构钢对应的混凝土强度等级

钢材强度等级	混凝土强度等级
Q235 和 Q345，或 X60 以下	C40~C60
Q390、Q420 和 Q460，或 X65、X70	C60 及以上

4.2.3 当外层钢管采用不锈钢、夹层材料采用混凝土时，夹层混凝土强度等级的确定应符合表 4.2.3 的规定。

表 4.2.3 不同不锈钢材料类型对应的混凝土强度等级

不锈钢材料统一数字代号	混凝土强度等级
S30408、S30403、S31608 和 S31603	C40~C60
S22053 和 S22253	C60 及以上

4.2.4 夹层材料为保温混凝土时，保温混凝土的热导率宜低于 0.2 W/(m·K)，抗压强度不宜低于 0.6 MPa，并且应具备良好体积稳定性。

4.3 连接材料

4.3.1 当钢管采用普通结构钢时，钢材焊接材料、连接紧固件和其他连接件的材料应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 中的有关规定。

4.3.2 当钢管采用不锈钢时，焊接材料、连接紧固件和其他连接件的材料应满足现行团体标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 或《不锈钢管混凝土结构技术规程》T/CECS 952 中的有关规定。

5 结构分析

5.1 一般规定

5.1.1 中空夹层复合海底管道结构应进行整体作用效应分析，并应对结构中受力状况特殊部位进行更详细地分析。

5.1.2 当结构在安装阶段和使用阶段有多种受力工况时，应分别进行结构分析，确定对结构最不利的作用组合，并应符合下列规定：

1 结构遭受地震、冲击等偶然作用时，尚应按国家现行有关标准的要求进行相应的结构分析；

2 当夹层材料的收缩及徐变、支座沉降、温度变化、腐蚀等间接作用在结构中产生的作用效应危及结构的安全或正常使用时，应进行相应的作用效应分析，并应采取相应的技术措施；

3 使用阶段的结构分析，应计入安装过程所形成的内力和变形对结构受力性能的影响。

5.1.3 结构分析应符合下列要求：

1 满足力学平衡条件；

2 符合变形协调条件，包括流体、土体和管端边界的约束条件等；

3 采用合理的材料本构模型；

4 进行安装阶段和使用阶段结构计算。

5.1.4 中空夹层复合海底管道连接、铺设等主要安装阶段，应进行管道结构强度、变形和稳定计算。

5.1.5 安装阶段结构分析中，应计入安装全过程中出现的实际作用和效应，包括船舶运动、张紧器张力波动、托管架变形、水动力荷载、管土作用等的影响。

5.2 计算指标

5.2.1 中空夹层复合海底管道轴心受压的外钢管和夹层材料截面的轴压强度设计值应满足式（5.2.1-1）的要求：

$$f_{osc} = C_1 \chi^2 f_o + C_2 (1.14 + 1.02 \xi_o) f_c \quad (5.2.1-1)$$

$$C_1 = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (5.2.1-2)$$

$$C_2 = \frac{1 + \alpha_n}{1 + \alpha} \quad (5.2.1-3)$$

$$\xi_o = \frac{A_{so} f_o}{A_{ce} f_c} \quad (5.2.1-4)$$

$$\alpha = \frac{A_{so}}{A_c} \quad (5.2.1-5)$$

式中： f_{osc} ——外钢管和夹层材料截面的轴压强度设计值（N/mm²）；

C_1 、 C_2 ——计算系数；

α ——截面含钢率；

α_n ——名义截面含钢率；

ξ_o ——名义约束效应系数设计指标；

A_{so} ——外钢管的横截面面积（mm²）；

A_{ce} ——外层钢管内壁所围的横截面面积（mm²）；

A_c ——夹层材料的横截面面积（mm²）；

χ ——截面空心率；

f_o ——外钢管钢材的抗拉和抗压强度设计值（N/mm²）；

f_c ——夹层材料的轴心抗压强度设计值（N/mm²）。

5.2.2 中空夹层复合海底管道的截面弹性抗压刚度 $(EA)_{sc}$ 应按下列式计算：

$$(EA)_{sc} = E_s (A_{si} + A_{so}) + E_c A_c \quad (5.2.2)$$

式中： E_s 、 E_c ——钢材和夹层材料的弹性模量（N/mm）；

A_{si} 、 A_{so} ——内、外钢管的钢横截面面积（mm²）；

A_c ——夹层材料的横截面面积（mm²）。

5.2.3 中空夹层复合海底管道的截面弹性抗弯刚度 $(EI)_{sc}$ 应按下列式计算：

$$(EI)_{sc} = E_s (I_{si} + I_{so}) + a E_c I_c \quad (5.2.3)$$

式中： I_{si} 、 I_{so} 、 I_c ——内、外钢管及夹层材料的截面惯性矩（mm⁴）；

a ——夹层材料刚度折减系数，取 $a = 0.6$ 。

5.2.4 当夹层材料为混凝土时，中空夹层复合海底管道中外钢管与夹层混凝土以及内钢管与夹层混凝土之间的粘结强度设计值 f_b 取值应符合下列规定：

- 1 对于钢管表面粗糙度 R_a 不小于 5 时应取 $f_b=0.225\text{N/mm}^2$ ；
- 2 对于钢管表面粗糙度 R_a 小于 5 时应满足下式要求：

$$f_b=0.0675+0.0315R_a \quad (5.2.4)$$

5.3 分析方法

5.3.1 海洋管道分析应包括安装分析和在位分析。

5.3.2 中空夹层复合海底管道安装和在位分析参数应根据环境参数和管道参数确定。

5.3.3 安装分析和在位分析用基础参数应根据 8.1.2 选取。

5.3.4 中空夹层复合海底管道的安装分析应分别进行静力分析和动力分析。

5.3.5 中空夹层复合海底管道的安装动力分析应考虑海洋动力环境的影响。

5.3.6 在位分析应考虑钢管初应力、夹层材料脱空等初始缺陷、设计温度和海床相互作用的影响。

5.3.7 中空夹层复合海底管道在位分析应校核管道强度，检验在位服役全过程是否满足相关规定。

5.3.8 根据项目要求中空夹层复合海底管道的安装和在位分析应开展相关参数分析。

6 管道承载力计算

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于承受静力荷载或间接承受动力荷载作用且夹层材料采用普通混凝土的中空夹层复合海底管道结构承载力计算。

6.1.2 由制造或安装等过程引起的钢管初应力限值应为空钢管承载力对应临界应力值的 35%。当中空夹层复合海底管道中制造或安装等过程引起的内层或外层钢管初应力小于限值时，可忽略制造或安装过程对管道承载力计算的影响。

6.2 压（拉）、弯、扭复合受力承载力计算

6.2.1 中空夹层复合海底管道结构的轴心受压承载力应符合式（6.2.1-1）的规定，且宜按式（6.2.1-2）计算：

$$N \leq \varphi N_u \quad (6.2.1-1)$$

$$N_u = N_{osc,u} + N_{i,u} \quad (6.2.1-2)$$

$$N_{osc,u} = f_{osc} (A_{so} + A_c) \quad (6.2.1-3)$$

$$N_{i,u} = f_i A_{si} \quad (6.2.1.4)$$

$$\varphi = \begin{cases} 1 & \lambda \leq \lambda_o \\ a\lambda^2 + b\lambda + c & \lambda_o < \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{d(1-0.23\chi^2)}{(\lambda+35)^2} & \lambda > \lambda_p \end{cases} \quad (6.2.1-5)$$

$$\lambda_o = \pi \sqrt{\frac{420\xi + 550}{f_{oscy}}} \quad (6.2.1-6)$$

$$\lambda = \frac{4l_0}{\sqrt{D_o^2 + (D_i - 2t_i)^2}} \quad (6.2.1-7)$$

$$f_{oscy} = C_1 \chi^2 f_{yo} + C_2 (1.14 + 1.02\xi) f_{ck} \quad (6.2.1-8)$$

其中： N ——轴力设计值（N）；

N_u ——中空夹层复合海底管道结构的截面受压承载力 (N) ;
 $N_{osc,u}$ ——外钢管和夹层材料的截面受压承载力 (N) ;
 $N_{i,u}$ ——内钢管的截面受压承载力 (N) ;
 A_{so} ——外钢管的横截面面积 (mm^2) ;
 A_c ——夹层材料的横截面面积 (mm^2) ;
 A_{si} ——内钢管的钢横截面面积 (mm^2) ;
 f_i ——内钢管钢材的抗拉和抗压强度设计值 (N/mm^2) ;
 f_{osc} ——外钢管和夹层材料截面的轴压强度设计值 (N/mm^2) ;
 a, b, c, d, e ——计算系数, 可按现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》
 GB/T 51446 计算;
 λ ——管道的长细比;
 λ_o ——管道弹塑性失稳的界限长细比;
 λ_p ——管道弹性失稳的界限长细比, 可按现行国家标准《钢管混凝土混合结构技
 术标准》GB/T 51446 计算;
 l_0 ——管道的计算长度 (mm) ;
 D_o ——外钢管外径 (mm) ;
 D_i ——内钢管外径 (mm) ;
 t_i ——内钢管壁厚 (mm) ;
 f_{oscy} ——外钢管和夹层钢管混凝土截面的轴压强度标准值 (N/mm^2) ;
 f_{yo} ——外钢管钢材的屈服强度 (N/mm^2) ;
 f_{ck} ——夹层材料的轴心抗压强度标准值 (N/mm^2) ;
 ξ ——名义约束效应系数。

6.2.2 中空夹层复合海底管道结构的轴心受拉承载力应满足式 (6.2.2-1) 的要求:

$$N_t \leq N_{t,u} \quad (6.2.2-1)$$

$$N_{t,u} = 1.1f_o A_{so} + f_i A_{si} \quad (6.2.2-2)$$

式中: N_t ——轴向拉力设计值 (N) ;

$N_{t,u}$ ——中空夹层复合海底管道结构的轴心受拉承载力 (N) 。

6.2.3 中空夹层复合海底管道结构的受弯承载力应满足式 (6.2.3-1) 的要求:

$$M \leq M_u \quad (6.2.3-1)$$

$$M_u = M_{osc,u} + M_{i,u} \quad (6.2.3-2)$$

$$M_{osc,u} = \gamma_{m1} W_{scm} f_{osc} \quad (6.2.3-3)$$

$$M_{i,u} = \gamma_{m2} W_{sim} f_i \quad (6.2.3-4)$$

$$\gamma_{m1} = 0.48 \ln(\xi + 0.1) (1 + 0.06\chi - 0.85\chi^2) + 1.1 \quad (6.2.3-5)$$

$$\gamma_{m2} = -0.02\chi^{-2.76} \ln \xi + 1.04\chi^{-0.67} \quad (6.2.3-6)$$

式中： M ——弯矩设计值（ $N \cdot mm$ ）；

M_u ——中空夹层复合海底管道结构的受弯承载力（ $N \cdot mm$ ）；

$M_{osc,u}$ ——外钢管和夹层材料的截面受弯承载力（ $N \cdot mm$ ）；

$M_{i,u}$ ——内钢管的截面受弯承载力（ $N \cdot mm$ ）；

W_{scm} ——外钢管和夹层材料的截面抗弯模量（ mm^3 ）；

W_{sim} ——内钢管的截面抗弯模量（ mm^3 ）；

γ_{m1} ——外钢管与夹层材料的截面抗弯承载力系数；

γ_{m2} ——内钢管的截面抗弯承载力系数。

6.2.4 中空夹层复合海底管道结构在一个平面内承受压、弯荷载共同作用时，承载力应满足式（6.2.4-1）的要求：

$$\begin{cases} \frac{N}{\phi N_{c,u}} + \frac{a_1}{d_1} \left(\frac{M}{M_u} \right) \leq 1 & \frac{N}{N_{c,u}} \geq 2\phi^3 \eta_o \\ -b_1 \left(\frac{N}{N_{c,u}} \right)^2 - c_1 \frac{N}{N_{c,u}} + \frac{1}{d_1} \left(\frac{M}{M_u} \right) \leq 1 & \frac{N}{N_{c,u}} < 2\phi^3 \eta_o \end{cases} \quad (6.2.4-1)$$

$$a_1 = 1 - 2\phi^2 \eta_o \quad (6.2.4-2)$$

$$b_1 = \frac{1 - \zeta_o}{\phi^3 \eta_o^2} \quad (6.2.4-3)$$

$$c_1 = \frac{2(\zeta_o - 1)}{\eta_o} \quad (6.2.4-4)$$

$$d_1 = 1 - 0.4 \frac{N}{N_E} \quad (6.2.4-5)$$

$$\zeta_o = 1 + (0.18 - 0.2\chi^2)\xi^{-1.15} \quad (6.2.4-6)$$

$$\eta_o = \begin{cases} (0.5 - 0.245\xi)(1 + 0.7\chi - 1.8\chi^2) & \xi \leq 0.4 \\ (0.1 + 0.14\xi^{-0.84})(1 + 0.7\chi - 1.8\chi^2) & \xi > 0.4 \end{cases} \quad (6.2.4-7)$$

$$N_E = \frac{\pi^2 (E_s I_{so} + E_s I_{si} + E_c I_c)}{l_0^2} \quad (6.2.4-8)$$

式中： a_1, b_1, c_1, d_1 ——计算系数；

η_o —— N/N_u - M/M_u 关系曲线平衡点的纵坐标；

ζ_o —— N/N_u - M/M_u 关系曲线平衡点的横坐标；

N_E ——欧拉临界力（N）；

E_s, E_c ——钢材和夹层材料的弹性模量（N/mm²）；

I_{so}, I_{si} ——外钢管和内钢管的截面惯性矩（mm⁴）；

I_c ——夹层材料的截面惯性矩（mm⁴）。

6.2.5 中空夹层复合海底管道结构在一个平面内承受拉、弯荷载共同作用时，承载力应满足式（6.2.5）的要求：

$$\frac{N_t}{N_{t,u}} + \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (6.2.5)$$

式中： N_t ——轴向拉力设计值（N）；

$N_{t,u}$ ——中空夹层复合海底管道的轴心受拉承载力（N）；

M ——弯矩设计值（N·mm）；

M_u ——中空夹层复合海底管道结构的受弯承载力（N·mm），应按本规程式（6.2.3-2）计算。

6.2.6 中空夹层复合海底管道结构的受扭承载力应满足式（6.2.6-1）的要求：

$$T \leq T_u \quad (6.2.6-1)$$

$$T_u = T_{osc,u} + T_{i,u} \quad (6.2.6-2)$$

$$T_{osc,u} = \gamma_t W_{sct} \tau_{scy} \quad (6.2.6-3)$$

$$\gamma_t = (-0.382\chi^2 + 0.0414\chi + 0.2669)\ln \xi - 0.1826\chi + 1.3013 \quad (6.2.6-4)$$

$$\tau_{scy} = (0.422 + 0.313\alpha^{2.33})\xi^{0.134} f_{osc} \quad (6.2.6-5)$$

$$T_{i,u} = W_{sit} \tau_{vi} \quad (6.2.6-6)$$

$$\tau_{vi} = f_i / \sqrt{3} \quad (6.2.6-7)$$

式中： T ——扭矩设计值（N·mm）；

T_u ——中空夹层复合海底管道结构的抗扭承载力（N·mm）；

$T_{osc,u}$ ——外钢管和夹层材料的截面抗扭承载力（N·mm）；

$T_{i,u}$ ——内钢管的截面抗扭承载力（N·mm）；

γ_t ——抗扭承载力计算系数；

W_{sct} ——外钢管和夹层材料的截面抗扭模量（mm³）；

τ_{scy} ——外钢管和夹层材料截面的抗扭极限强度（N/mm²）；

f_{osc} ——外钢管和夹层材料截面的轴压强度设计值（N/mm²），应按本规程式（5.2.1-1）计算；

W_{sit} ——内钢管的截面抗扭模量（mm³）；

τ_{vi} ——内钢管抗扭极限强度（N/mm²）；

f_i ——内钢管钢材的抗拉和抗压强度设计值（N/mm²）。

6.2.7 中空夹层复合海底管道结构承受压、扭荷载共同作用时，承载力应按现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 计算。

6.2.8 中空夹层复合海底管道在弯矩、有效轴力和内外压力共同作用下的截面设计应满足下面要求：

1 当内部压力大于外部压力时，应满足式（6.2.8-1）的要求：

$$\left[\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{M}{M_u} + \left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot N}{N_u} \right)^2 \right]^2 + \left[\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b} \right]^2 \leq 1 \quad (6.2.8-1)$$

2 当外部压力大于内部压力时，应满足式（6.2.8-2）的要求：

$$\left[\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{M}{M_u} + \left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot N}{N_u} \right)^2 \right]^2 + \left[\alpha_p \cdot \frac{p_e - p_{min}}{\alpha_c \cdot p_c} \right]^2 \leq 1 \quad (6.2.8-2)$$

式中： γ_m ——材料抗力因子；

γ_{sc} ——安全等级抗力因子；

M ——弯矩设计值（N·mm）；

M_u ——中空夹层复合海底管道结构的受弯承载力（N·mm），应按本规程式（6.2.3-

2) 计算;

N ——轴力设计值 (N);

N_u ——中空夹层复合海底管道结构的截面受压承载力 (N), 应按本规程式

(6.2.1-2) 计算;

p_i ——内部压力 (MPa);

p_e ——外部压力 (MPa);

p_b ——破裂压力 (MPa);

p_{\min} ——管道能经受的最小压力 (MPa), 除了管道充水的情况外, 通常安装工况取值为零;

p_c ——中空夹层复合海底管道结构的压溃强度 (MPa);

α_c ——流动应力参数;

α_p ——用于组合荷载准则的压力因子。

6.2.9 中空夹层复合海底管道结构的压溃强度应满足下列规定:

1 当管道层间光滑无粘接、无摩擦, 且几何参数满足 $12.5 \leq D_o / t_o \leq 45$, $12.5 \leq D_i / t_i \leq 45$, $1.15 \leq D_o / D_i \leq 1.55$ 时, 可按式 (6.2.9-4) 计算中空夹层复合海底管道结构的压溃强度:

$$p_{E1} = 2 \frac{E_o}{1 - \nu_o^2} \left(\frac{t_o}{D_o} \right)^3 \quad (6.2.9-1)$$

$$p_{P1} = 2 f_{yo} \left(\frac{t_o}{D_o} \right) \quad (6.2.9-2)$$

$$f_1 = \min(p_{E1}, p_{P1}) \quad (6.2.9-3)$$

$$\frac{p_c}{f_1} = 1 + \left(\frac{D_o}{t_o} \right)^{0.091} \left[\begin{array}{l} 6.348 \cdot \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^{-1.969} \left(\frac{t_i}{t_o} \right)^{2.91} \left(\frac{f_{yi}}{f_{yo}} \right)^{-0.0224} \left(\frac{f_{yi}}{E_o} \right)^{0.364} \\ + 1.945 \cdot \left(\frac{D_c}{D_o} \right)^{-2.203} \left(\frac{t_c}{t_o} \right)^{2.990} \left(\frac{f_{yc}}{f_{yo}} \right)^{-0.205} \left(\frac{f_{yc}}{E_o} \right)^{0.300} \left(\frac{E_c}{E_o} \right)^{0.721} \end{array} \right] \quad (6.2.9-4)$$

式中: D_o ——外钢管外径直径 (mm);

t_o ——外钢管壁厚 (mm);

D_i ——内钢管外径 (mm);

t_i ——内钢管壁厚 (mm) ;
 p_{EI} ——弹性屈曲压力 (MPa) ;
 E_o ——外钢管钢材的弹性模量 (GPa) ;
 ν_o ——外钢管钢材的泊松比;
 p_{PI} ——塑性屈曲压力 (MPa) ;
 f_{yo} ——外钢管钢材的屈服强度 (MPa) ;
 f_i ——弹性屈曲压力和塑性屈曲压力中的最小值 (MPa) ;
 p_c ——中空夹层复合海底管道结构的压溃强度 (MPa) ;
 f_{yi} ——内钢管钢材的屈服强度 (MPa) ;
 D_c ——夹层材料外径 (mm) ;
 t_c ——夹层材料壁厚 (mm) ;
 E_c ——夹层材料的弹性模量 (GPa) ;
 f_{yc} ——夹层材料的屈服强度 (MPa) 。

2 当管道几何参数 $D_o/t_o \leq 12.5$ 或 $D_o/t_o \geq 45$, $D_i/t_i \leq 12.5$ 或 $D_i/t_i \geq 45$, $D_o/D_i \leq 1.15$ 或 $D_o/D_i \geq 1.55$ 时, 层间为部分或者完全粘接连接时, 以上公式不再适用, 应通过有限元计算中空夹层复合海底管道结构的压溃强度。

6.2.10 中空夹层复合海底管道结构的压溃传播压力应按以下规定计算:

1 当管道层间光滑无粘接、无摩擦, 且几何参数满足 $25 \leq D_o/t_o \leq 45$, $25 \leq D_i/t_i \leq 45$, $1.15 \leq D_o/D_i \leq 1.55$ 时, 可按式 (6.2.10-2) 计算中空夹层复合海底管道结构的压溃传播压力:

$$p_p = 35.0 f_{yo} \left(\frac{t_o}{D_o} \right)^{2.5} \quad (6.2.10-1)$$

$$\frac{p_{sp}}{p_p} = 1 + f_2 \left(\frac{D_o}{t_o} \right)^{-0.132} \left[1 + 30.07 \left(\frac{E'_o}{E_o} \right)^{1.364} \right] \quad (6.2.10-2)$$

$$f_2 = 0.269 \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^{-2.876} \left(\frac{t_i}{t_o} \right)^{2.585} \left(\frac{f_{yi}}{f_{yo}} \right)^{1.179} \left(\frac{f_{yi}}{E_o} \right)^{-0.241} \left[1 + 215.2 \left(\frac{E_i'}{E_o} \right)^{2.037} \right] \quad (6.2.10-3)$$

$$+ 0.772 \left(\frac{D_c}{D_o} \right)^{-8.099} \left(\frac{t_c}{t_o} \right)^{2.816} \left(\frac{f_{yc}}{f_{yo}} \right)^{0.780} \left(\frac{f_{yc}}{E_o} \right)^{-0.090} \left(\frac{E_c}{E_o} \right)^{0.407}$$

式中： p_p ——单钢管的压溃传播压力（MPa）；

p_{sp} ——中空夹层复合海底管道结构的压溃传播压力（MPa）；

f_2 ——计算参数；

E_o' ——外钢管钢材的硬化模量（GPa）；

E_i' ——内钢管钢材的硬化模量（GPa）。

2 当管道几何参数 $D_o/t_o \leq 25$ 或 $D_o/t_o \geq 45$ ， $D_i/t_i \leq 25$ 或 $D_i/t_i \geq 45$ ， $D_o/D_i \leq 1.15$ 或 $D_o/D_i \geq 1.55$ 时，层间为部分或者完全粘接连接时，以上公式不再适用，应通过有限元计算求得中空夹层复合海底管道结构的压溃传播压力。

6.3 长期荷载作用下的承载力计算

6.3.1 长期荷载作用下中空夹层复合海底管道结构的轴心受压承载力宜按下式计算：

$$N_{uL} = k_{cr} N_u \quad (6.3.1)$$

式中： N_{uL} ——长期荷载作用影响下结构的轴心受压承载力（N）；

N_u ——截面受压承载力（N）；

k_{cr} ——长期荷载影响系数，宜按现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 取值。

6.3.2 中空夹层复合海底管道材料的长期荷载作用影响，可参考附录 B 进行测试。

6.4 抗疲劳设计

6.4.1 承受直接动力荷载作用的中空夹层复合海底管道结构，当应力变化的循环次数大于或等于 5×10^4 次时，应进行疲劳验算。应力循环中不出现拉应力的部位，可不进行疲劳验算。

6.4.2 中空夹层复合海底管道结构进行疲劳验算时， $S-N$ 曲线宜采用下式进行计算或根据附录 C 测试：

$$\frac{N_{F,r}}{N_F} = \frac{0.173}{T_F^{1.7}} \quad (6.4.2)$$

式中： N_F ——中空夹层复合海底管道结构对应的外空钢管疲劳寿命（次）；

$N_{F,r}$ ——考虑钢管多向应力折减的中空夹层复合海底管道结构疲劳寿命（次）；

T_F ——应力三轴度。

7 防护设计

7.1 防腐蚀设计

7.1.1 中空夹层复合海底管道结构中的内层钢管或外层钢管发生腐蚀时，可采用“等效截面法”进行腐蚀后的承载力计算。局部腐蚀或点腐蚀可保守地等效为均匀腐蚀，钢管壁厚损失取局部腐蚀或点腐蚀区域壁厚损失的最大值，也可参考本规程附录 D 进行有关力学性能测试。

7.1.2 腐蚀后中空夹层复合海底管道结构的等效参数应按国家现行标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 和《海底管道系统》SY/T 10037 的有关规定计算。

7.2 抗低温设计

7.2.1 中空夹层复合海底管道在低温环境下，钢管材料可参照现行国家标准《低温管道用无缝钢管》GB/T 18984 和《低温管道用大直径焊接钢管》GB/T 37577 中对钢管规格要求的相关规定，夹层混凝土可参照现行国家标准《低温环境混凝土应用技术规范》GB 51081 中的相关规定。

7.2.2 在冻融环境下，夹层混凝土应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的有关规定，当轴压比大于 0.4 时，应进一步考虑轴压与冻融耦合作用对其承载力的影响。

7.3 抗撞击设计

7.3.1 当中空夹层复合海底管道结构受到撞击作用影响时，应根据国家现行标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 和《海底管道系统》SY/T 10037 等的有关规定采取有效抗撞措施。

7.3.2 受到撞击作用影响的中空夹层复合海底管道结构截面空心率不应大于 0.7，动力放大系数（DIF）可取 1.0。

7.3.3 当水深大于等于 50 米时，中空夹层复合海底管道结构受落物撞击作用可取为稳定速度，当水深小于 50 米时，中空夹层复合海底管道结构受落物撞击作用可取为相同质量落物于空气中 30 米高自由落体后的最终速度。

7.3.4 落物稳定速度作用下产生的有效撞击能量可按式或国家现行标准的有关规定计算：

$$E_E = E_T + E_A = \frac{1}{2}(m + m_a)v_T^2 \quad (7.3.4-1)$$

$$v_T^2 = \frac{2g}{C_D A} \left(\frac{m}{\rho_w} - V \right) \quad (7.3.4-2)$$

$$m_a = \rho_w \cdot C_a \cdot V \quad (7.3.4-3)$$

式中： E_E ——有效撞击能量（J）；

E_T ——落物动能（J）；

E_A ——落物的附加水动力能量（J）；

m ——落物质量（kg）；

m_a ——落物的附加水动力质量（kg）；

g ——重力加速度（取值 9.81m/s^2 ）；

V ——落物体积（ m^3 ）；

ρ_w ——水的密度（取值 1025kg/m^3 ）；

C_D ——落物的阻力系数，可查表 7.3.4 确定；

C_a ——落物的附加质量系数，可查表 7.3.4 确定；

A ——落物在下落方向的投影面积（ m^2 ）；

v_T ——落物稳定下落速度（ m/s ）。

表 7.3.4 落物在水下的阻力系数与附加质量系数

落物几何形状	阻力系数（ C_D ）	附加质量系数（ C_a ）
细长形	0.7–1.5	0.1–1.0
箱形	1.2–1.3	0.6–1.5
混合形（球形或复合形）	0.6–2.0	1.0–2.0

7.4 抗爆炸设计

7.4.1 爆炸作用后中空夹层复合海底管道结构损伤等级可按表 7.4.1 确定。

表 7.4.1 中空夹层复合海底管道结构损伤等级

损伤等级	特征
A 级	内层钢管没有破损，内层或外层钢管表面凹痕深度不大于其直径的 5%。
B 级	内层钢管没有破损，内层或外层钢管表面凹痕深度大于其直径的 5%。
C 级	内层钢管破损，管内油气泄漏。

7.4.2 爆炸作用后中空夹层复合海底管道结构的轴心受压承载力可按如下方法计算：

1 当水下爆炸点的比例爆距不小于 $0.23 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 且不大于 $0.55 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ ，或目标中空夹层复合海底管道结构损伤指数不小于 0.2 时：

$$N_{b,u} = (1 - \psi_b) N_u \quad (7.4.2-1)$$

$$\psi_b = 2.74e^{-4.7(Z_b/z)} \quad (7.4.2-2)$$

$$Z_b = \frac{R_b}{\sqrt[3]{W_b}} \quad (7.4.2-3)$$

式中： $N_{b,u}$ ——爆炸作用后中空夹层复合海底管道结构的剩余截面受压承载力（N）；

N_u ——中空夹层复合海底管道结构的截面受压承载力（N），宜按式（6.2.1-2）计算；

ψ_b ——爆炸作用后中空夹层复合海底管道结构损伤指数；

Z_b ——水下爆炸的比例爆距（ $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ ）；

R_b ——水下爆炸中心点到中空夹层复合海底管道结构迎爆表面的直线距离（m）；

W_b ——水下爆炸等效 TNT 装药量（kg）。

2 当水下爆炸点的比例爆距小于 $0.23 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 或大于 $0.55 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ ，或目标中空夹层复合海底管道结构损伤小于 0.2 时，需要进行结构动态响应分析。

8 制造、安装和验收

8.1 一般规定

8.1.1 中空夹层复合海底管道的内层钢管和外层钢管在制造阶段，应通过定位装置保证内、外钢管的轴线相对偏差 δ （图 8.1.1）不宜超过 5 mm。

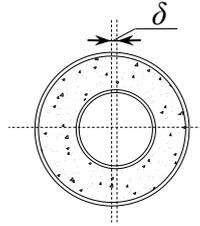


图 8.1.1 中空夹层复合海底管道形心位置相对偏差示意图

8.1.2 中空夹层复合海底管道结构在制造和安装前，应根据制造安装设计文件的要求编制制造工艺；同时应根据设计要求对构造复杂的结构进行工艺试验评定，制定相应的制造工艺或作业指导书。

8.2 制造

8.2.1 中空夹层复合海底管道的外钢管外侧和内钢管内侧应采取防腐措施，防腐蚀采用的涂料、防腐蚀对内层钢管及外层钢管结构的构造要求等，应符合现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 的有关要求。

8.2.2 中空夹层复合海底管道中夹层材料浇筑或填充前应将夹层内杂物、积水清理干净。在浇筑或填充夹层材料时，应避免夹层材料跌落内管中。夹层材料浇筑或填充应考虑安装过程中的有关要求。

8.3 安装

8.3.1 采用 S 型铺设法时，托管架半径应根据详细设计或施工设计确定，托管架长度应根据铺管船确定。

8.3.2 中空夹层复合海底管道的安装应符合《海底管道系统》SY/T 10037 的相关规定。

8.4 验收

8.4.1 预调试程序和应急程序的编制，应符合现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 中的有关规定。

8.4.2 中空夹层复合海底管道安装的允许偏差、焊缝的尺寸偏差、外观质量和内部质量检验、焊缝等级以及探伤要求，应符合现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 中的有关规定。

8.4.3 在达到稳定生产状态后，应对运行极限状态是否于设计工况内进行验证。重点关注的问题包括：

- 1 流动参数(压力、温度等)；
- 2 阴极保护系统；
- 3 管道热膨胀；
- 4 管道移动；
- 5 侧向蛇形弯曲；
- 6 自由悬跨和暴露。

附录 A 钢与混凝土的界面粘结强度测试

A.0.1 钢管混凝土中钢-混凝土界面粘结力包括化学胶结力、微观咬合力以及宏观咬合力。

A.0.2 本附录中钢与混凝土的界面粘结强度测试方法适合钢板混凝土和钢管混凝土两种试件粘结强度的测试。

A.0.3 试验程序应根据界面性能测试流程进行试验。

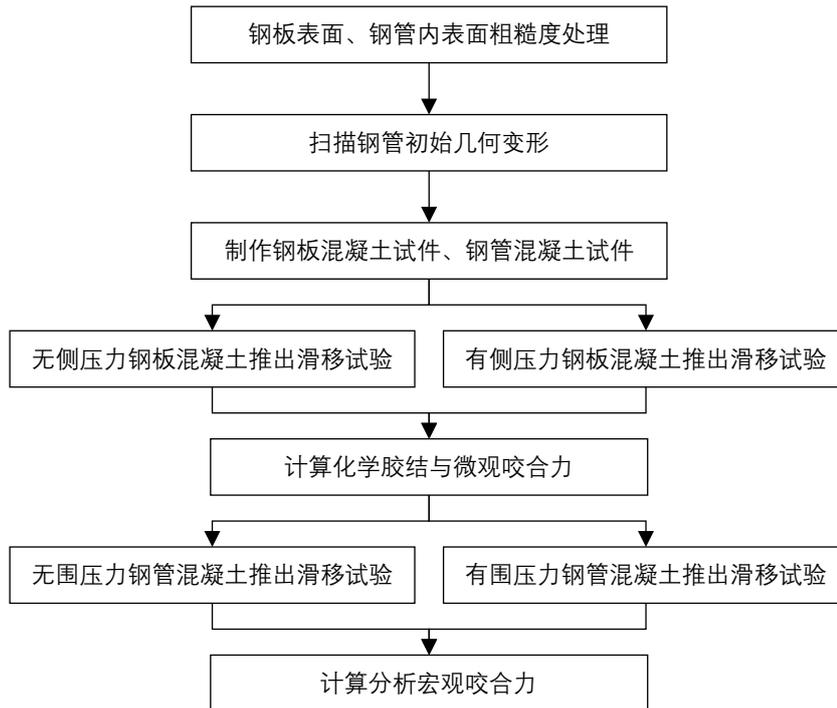


图 A.0.3 界面性能测试流程

A.0.4 测试结果应包括以下信息：

- 1 试件钢板、钢管表面的粗糙度；
- 2 推出滑移试验中试件荷载-位移曲线；
- 3 推出滑移试验中混凝土块、钢管表面应变全过程数据；
- 4 试件破坏形态。

附录 B 复合管道夹层材料长期性能测试

B.0.1 本附录规定了复合管道夹层材料长期性能测试的试验装置、试验方法以及测试结果要求等。

B.0.2 针对素混凝土和复合管道中的夹层混凝土的混凝土收缩试验，当混凝土浇筑成型后可采用千分表对素混凝土和复合管道中的夹层混凝土进行轴向收缩量测量。

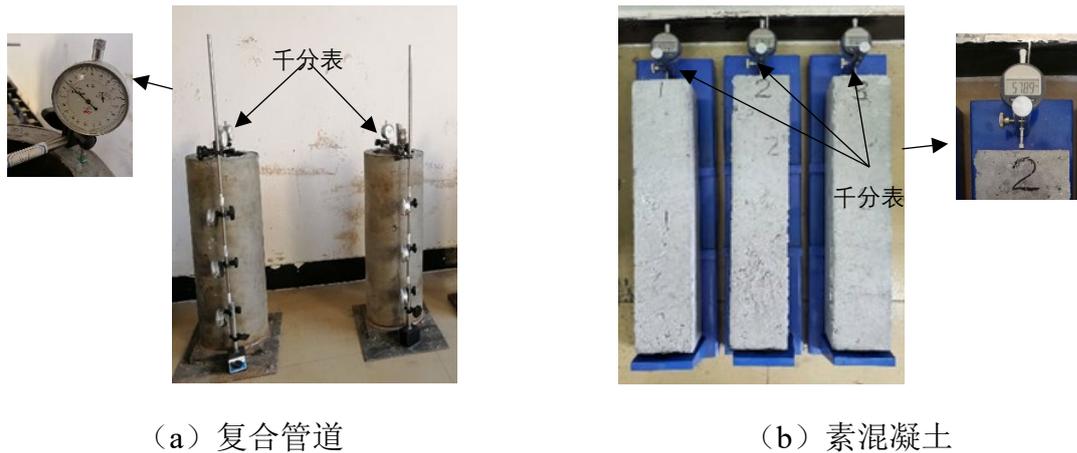


图 B.0.2 收缩试验装置

B.0.3 长期荷载作用下的徐变装置应包括力传感器、千分表、高强螺栓、承力板、螺杆和复合管道。

B.0.4 轴心受压力学性能试验装置应包括：液压试验机、LVDT、复合管道和配套的数据采集系统。

B.0.5 试验程序应满足试验测试的要求。

B.0.6 测试结果一般应包括以下信息：

- 1 素混凝土及复合管道夹层混凝土收缩-时间曲线；
- 2 复合管道长期荷载下徐变-时间曲线；
- 3 复合管道轴压荷载-位移曲线；
- 4 复合管道破坏形态。

附录 C 复合管道结构疲劳性能测试

C.0.1 本附录规定了复合管道结构疲劳性能测试的试验装置、试验方法以及测试结果要求等。

C.0.2 试验装置应满足下列要求：

- 1 本测试方法的试验装置主要包括了试验管道和试验设备两部分；
- 2 试验管道为复合管道，内层钢管为通长无焊缝的钢管，外层钢管的跨中采用对接焊接，将两段无缝钢管连接，中空夹层浇筑混凝土填充材料；
- 3 四点弯曲疲劳试验装置主要包括疲劳试验机、力传感器、分配梁和夹具。

C.0.3 试验程序应符合下列流程：

- 1 制作复合管道疲劳试验构件；
- 2 选取测试用复合管道，进行外层钢管质量检测和焊缝无损质量检测，探测焊缝中是否存在气孔、夹渣、未焊透和未熔合等焊接缺陷；
- 3 组合安装四点弯曲疲劳试验装置，开展四点弯曲疲劳试验；
- 4 通过力传感器测量试验机施加在分配梁上的荷载，进行跨中弯矩的计算；通过贴在外层钢管外表面的应变片测量四点弯曲纯弯段的钢材应变，通过应变可计算应力，结合抗弯刚度可进行跨中弯矩的计算，结合泊松比可进行管内压力的计算；通过LVDT，测量跨中及两个夹具处的挠度，进一步可计算跨中与支座处的挠度差，从而计算纯弯段曲率，结合抗弯刚度可进行跨中弯矩的计算。

C.0.4 测试结果一般应包括以下信息：

- 1 疲劳试验管道跨中弯矩和管内压力；
- 2 复合管道疲劳破坏后疲劳应力幅与疲劳寿命；
- 3 复合管道疲劳破坏形态。

附录 D 力和腐蚀共同作用下钢管材料性能测试

D.0.1 本附录规定了钢管材料在力与腐蚀共同作用下性能测试的试验装置、试验方法及测试结果要求等。

D.0.2 试验装置应满足试验测试相关要求。

D.0.3 试验程序应包括试件准备、装置组装、加载、腐蚀试验以及材料性能试验。

D.0.4 测试结果一般应包括以下信息：

- 1 试验过程中钢管材料试件产生断裂的时间；
- 2 钢管材料试件试验前后的屈服强度、拉伸强度以及伸长率；
- 3 钢管材料试件试验过程中的失重；
- 4 应力腐蚀钢管材料试件断口金相观察。

本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的用词：
正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：
正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：
正面词采用“宜”或“可”；反面词采用“不宜”。
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 规程中指明应按其它有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《钢结构设计标准》 GB 50017

《石油天然气工业管线输送系统用钢管》 GB/T 9711

《混凝土结构设计规范》 GB 50010

《混凝土强度检验评定标准》 GB/T 50107

《钢结构工程施工规范》 GB 50755

《钢管混凝土混合结构技术标准》 GB/T 51446

《工程结构通用规范》 GB 55001

《碳素结构钢》 GB/T 700

《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591

《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第 1 部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》 GB/T 8923.1

《建筑结构用钢板》 GB/T 19879

《建筑用不锈钢焊接管材》 JG/T 539

《海底管道系统》 SY/T 10037-2018

《不锈钢结构技术规范》 CECS 410

《不锈钢管混凝土结构技术规程》 T/CECS 952

中国工程建设标准化协会标准
海洋工程钢管混凝土结构技术规程
(中空夹层复合海底管道结构技术规程)

T/CECS XXX—202X

条 文 说 明

目 次

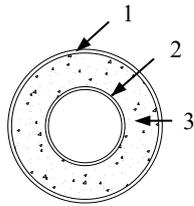
1	总 则.....	44
2	术语和符号.....	45
	2.1 术语	45
	2.2 符号	45
3	基本规定.....	46
	3.2 作用与作用组合	46
	3.3 构造规定	46
4	材 料.....	47
	4.1 钢材	47
	4.2 夹层材料	48
	4.3 连接材料	48
5	结构分析.....	50
	5.2 计算指标	50
	5.3 分析方法	51
6	管道承载力计算.....	54
	6.1 一般规定	54
	6.2 压（拉）、弯、扭复合受力承载力计算	54
	6.4 抗疲劳设计	54
7	防护设计.....	57
	7.1 防腐蚀设计	57
	7.2 抗低温设计	57
	7.3 抗撞击设计	57
	7.4 抗爆炸设计	58
8	制造、安装和验收.....	60
	8.4 验收	60
	附录 A 钢与混凝土的界面粘结强度测试	61
	附录 B 复合管道夹层材料长期性能测试	63

附录 C 复合管道结构疲劳性能测试	66
附录 D 力和腐蚀共同作用下钢管材料性能测试	67

1 总 则

1.0.2 规定本规程的适用范围。

本规程所涉及的中空夹层复合海底管道结构的横截面示意如图 1 所示。即为由内、外两个截面形心重合的钢管组成，并在钢管夹层中浇筑混凝土且共同受力的结构，截面形式为圆套圆。



1—外钢管 2—内钢管 3—夹层材料

图 1 中空夹层复合海底管道横截面示意图

内钢管和外钢管间之间需设置适当的构造连接措施，以保证外钢管和内钢管在受力过程中的共同工作。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.5 名义约束效应系数是表征中空夹层复合海底管道截面几何尺寸和组成材料物理特性的综合参数。

2.2 符号

2.2.3 外钢管的钢横截面面积 A_{so} 、夹层材料的横截面面积 A_c 、内钢管的钢横截面面积 A_{si} 、外层钢管内壁所围的横截面面积 A_{ce} 、中空夹层复合海底管道横截面尺寸示意图按现行团体标准《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》T/CCES 7 的规定计算。

3 基本规定

3.2 作用与作用组合

3.2.2 当有可靠依据时，中空夹层复合海底管道结构动力系数可在 1.3–2.0 间取值。

3.2.2 本条文参考了现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 中的有关规定。

3.2.3 中空夹层复合海底管道结构的设计与安装过程应考虑包括：风、波浪、海流、潮汐、冰情、地震与海啸、海洋物理、海洋化学、海洋生物、海洋地质、海洋污染、海底地形、海底障碍物、海底土壤特性、海底浅层特性（如浅断层、塌陷等）和海床稳定性等海洋环境条件。

3.2.4 本条文参考了现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 中的有关规定。

3.3 构造规定

3.3.1~3.3.3 中空夹层复合海底管道结构的构造应符合下列规定：

1 最小管径、最小壁厚和内外钢管净间距的规定是为了保证混凝土浇筑质量、钢管焊接质量以及结构受力性能而确定的。研究表明，中空夹层复合海底管道壁的稳定性，由于存在夹层混凝土而有所提高。

2 名义截面含钢率 α_n 、截面空心率 χ 、名义约束效应系数 ζ 应满足现行团体标准《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》T/CCES 7 的有关规定。

4 材 料

4.1 钢材

4.1.1 结合中空夹层复合海底管道结构的受力要求和现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定提出了对钢材的要求。当采用耐候钢时，其质量要求应符合现行国家标准《耐候结构钢》GB/T 4171 的规定。

4.1.2 奥氏体型不锈钢含有高比例的铬和镍，使其具有优异的耐腐蚀性，能够在多种腐蚀介质中保持稳定，在一些特定环境下具有较好的抗应力腐蚀开裂性能，且奥氏体型不锈钢具有良好的可塑性和可加工性，可以方便地进行冷加工和热加工；铁素体型不锈钢相对于奥氏体型不锈钢具有较高的强度，适用于一些要求高强度的应用场合，而且具有较好的耐磁性，对磁场的影响较小；奥氏体-铁素体双相型不锈钢结合了奥氏体和铁素体的特点，具有较高的强度和良好的韧性，以及良好的耐腐蚀性能，适用于一些要求高强度和耐腐蚀性的应用场合。不锈钢牌号及性能指标应根据结构使用环境、荷载类型、结构形式、钢管壁厚、成型方法和表面要求，合理选取不锈钢牌号并确定性能指标，同时应在设计文件中注明。例如：当中空夹层复合海底管道结构应用于直接接触海水地区、生产腐蚀性产品的工业厂房、与腐蚀性介质直接接触或存在潜在腐蚀性介质的环境时，应注意服役过程中可能出现的不锈钢管的应力腐蚀。中空夹层复合海底管道可能用于输送高腐蚀性含碳化合物，服役过程中可能出现不锈钢管点腐蚀穿孔失效，此时，建议选用耐腐蚀性较高的统一数字代号为 S31603 的奥氏体型不锈钢或 S22053、S22253 的双相型不锈钢，必要时不锈钢管表面应采用定期维护、涂层或电化学防护措施。不锈钢管在腐蚀性介质及工作应力、加工过程中产生的残余应力（塑性加工焊接、装配过程中产生的残余应力）共同作用下，将出现低于材料极限强度的脆性开裂，即应力腐蚀破裂。当不锈钢管中空夹层复合海底管道结构服役于可能出现应力腐蚀的环境中时，建议选用抗腐蚀性较高的双相型不锈钢，并注意对不锈钢管表面的检查、清理以防止腐蚀性离子的富集；当有可靠依据时，也可选用奥氏体型不锈钢当无法满足定期维护的条件时，需要开展针对性研究。

4.2 夹层材料

4.2.1 由于内、外钢管形成封闭环境，夹层混凝土多余水分不能排除，因而水胶比不宜过大。水胶比要求参考现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55。采用的混凝土种类主要决定于所采用的浇筑工艺。宜采用微膨胀混凝土，严格控制氯离子含量，严防锈蚀，严防混凝土碱骨料反应，并经现场同条件试验合格后使用。当采用轻骨料混凝土、再生混凝土和砂浆作为夹层材料时，要求参考国家现行标准《轻骨料混凝土技术标准》JGJ/T 12、《钢管再生混凝土结构技术规程》T/CECS 625 和《预拌砂浆》GB/T 25181。

4.2.2 设计时需要考虑复合管内混凝土强度等级和外钢管材料牌号的合理匹配，以保证外钢管和混凝土材料间的协同互补及组合作用。在常用截面含钢率情况下，对钢材强度等级为 Q235 和 Q345 的普通碳素钢，以及 X60 以下的管线钢，建议匹配 C40~C60 混凝土；对于钢材强度等级为 Q390、Q420 和 Q460 的普通碳素钢，以及 X65 和 X70 的管线钢，建议匹配 C60 以上混凝土。

4.2.3 设计时需要考虑不锈钢内混凝土强度等级和不锈钢管材料牌号的合理匹配，以保证不锈钢管和混凝土材料间的协同互补及组合作用。在常用截面含钢率情况下，对材料统一数字代号为 S30408, S30403, S31608, S31603 的不锈钢，建议匹配 C40~C60 混凝土；对于材料统一数字代号为 S22053, S22253 的不锈钢，建议匹配 C60 以上混凝土。

4.3 连接材料

4.3.2 本条文中参考现行团体标准《不锈钢结构技术规程》CECS 410 或《不锈钢管混凝土结构技术规程》T/CECS 952 的有关规定，关于焊接材料应符合现行国家标准《不锈钢焊条》GB/T 和《不锈钢药芯焊丝》GB/T 17853 或《埋弧焊用不锈钢焊丝-焊剂组合分类要求》GB/T 17854 的有关规定；连接紧固件应符合现行国家标准《紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.6、《紧固件机械性能 不锈钢螺母》GB/T 3098.15、《紧固件机械性能 不锈钢自攻螺钉》GB/T 3098.21、《环槽铆钉连接副 技术条件》GB/T 36993；高强度螺栓应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228、《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229、《钢结构用高强度

垫圈》GB/T 1230、《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 或《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632 和《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副技术条件》GB/T 3633 的有关规定。

5 结构分析

5.2 计算指标

5.2.1 中空夹层复合海底管道外钢管和夹层材料结构处于温度变化的环境时，其轴心抗压强度将受温度变化的影响。本规程未列入考虑环境温度影响的计算方法。当环境温度变化较大时，中空夹层复合海底管道外钢管和夹层材料轴心抗压强度随温度变化的影响不宜忽略，可在本条的基础上，以 20℃ 为基准温度，通过试验和分析确定轴心抗压强度设计指标的下降率。

5.2.2 为了简化计算，中空夹层复合海底管道结构组合弹性抗弯刚度 $(EI)_{sc}$ 应按内钢管、外钢管与夹层材料三部分刚度叠加的方法计算，同时考虑夹层材料开裂和当夹层材料为混凝土时的徐变影响，将夹层材料部分的刚度适当降低，即本规程中式 (5.2.2)。

5.2.4 结合试验研究数据，钢材表面粗糙度 R_a 对界面粘结强度有很大影响，在现有粘结强度计算公式中少有考虑粗糙度影响，通过先筛选出已有研究中提及了钢材表面生锈的构件，对生锈表面粘结强度进行回归分析，得到粘结强度与钢管尺寸 (t/D^2) 之间的关系，然后利用精确测量了表面粗糙度的构件，分析表面未生锈(界面粗糙度低)对粘结强度的影响。

1 当钢管表面粗糙度不小于 5 时，不考虑其对粘结强度设计值的影响，因此粘结强度设计值参考现行团体标准《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》T/CCES 7 中的有关规定选取。

2 当钢管表面粗糙度小于 5 时，结强度设计值根据研究所得到的考虑界面粗糙度的粘结强度设计值计算式 (1) 以及粘结强度折减系数计算式 (2) 进行计算。

$$f_b = \kappa \left[0.071 + 4900 \left(\frac{t}{D^2} \right) \right] \quad (1)$$

$$\kappa = \begin{cases} 1 & R_a \geq 5 \\ 0.3 + 0.14R_a & R_a < 5 \end{cases} \quad (2)$$

式中： f_b ——钢管和夹层混凝土粘结强度设计值 (N/mm²)；

κ ——钢管与夹层混凝土之间的粘结强度折减系数；

D ——钢管外径（mm）；
 t ——钢管壁厚（mm）；
 R_a ——钢管表面粗糙度（ μm ）。

5.3 分析方法

5.3.2 可参考现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037、《滩海管道系统技术规范》SY/T 0305 和现行企业标准《带有在线结构物的海底管道安装计算分析指南》Q/HS 3066 进行确定。

环境参数包括：潮汐、水深、海水密度、海流、波浪、地貌与工程地质。其中，潮汐参数即最高天文潮（HAT）及最低天文潮（LAT），通常取一年一遇；水深参数即海图基准面（CD）或平均海平面（MSL）；海流参数即不同水深处的流速；波浪参数即最大波高（ H_{\max} ）及相应周期、有义波高（ H_s ）及相应周期等；地貌与工程地质即海床地形和土壤参数；管道参数包括：管道特性和涂层，涂层包括混凝土配重层和外防腐涂层。其中，管道特性包括结构类型（复合管道等）、材料强度等级（外层钢管、夹层材料及内层钢管）、尺寸（壁厚、管径）、物理特性（弹性模量、最小屈服强度、泊松比和密度等）；涂层包括厚度和密度。

5.3.4 静力分析可不考虑环境荷载作用，分析结果应筛选出安装期关键位置。在不考虑环境荷载作用下，进行静力分析，获得复合管道安装全过程的受力和变形变化规律。在静力分析的基础上，筛选安装期关键位置。根据复合管道荷载、应力或应变结果，筛选出应力或变形较大的关键位置，常见位置包括上弯段或托管架处、水中悬跨处、下弯段或着泥点处等，如图 2 和图 3 所示。

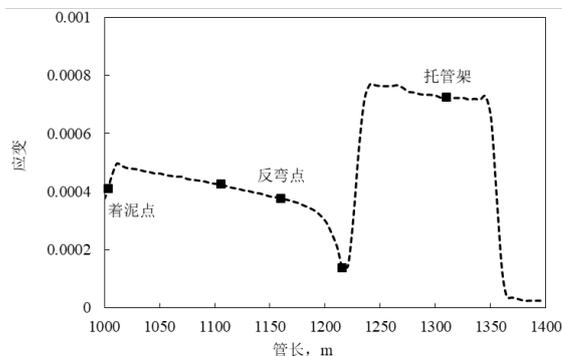


图 2 典型管道应变沿管长分布规律

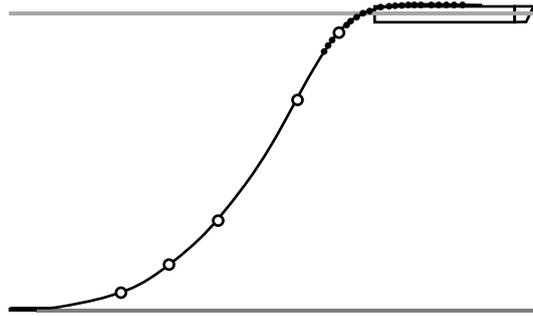


图3 S型铺设管道常见关键位置

5.3.5 中空夹层复合海底管道结构的安装动力分析可采用动力放大系数和关键位置动力分析法考虑海洋动力环境的影响。动力放大系数法可根据工程实际情况选取 $DAF=1.2\sim 2.0$ 或在其它范围取值；在筛选的关键位置处应考虑波浪、海流以及船舶运动等环境荷载进行动力分析。

动力分析要点包括：

- 1 可在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 环境荷载方向下，以环向每 45° 增量考虑工况组合；
- 2 可通过运动响应因子（RAO）分析船体运动，对于动力定位（DP）船舶可不考虑低频运动；
- 3 波浪荷载作用可以采用规则波或不规则波分析理论，分析结果应规避模型平衡建立前的瞬态效应；
- 4 输出计算结果包括但不限于：张紧器顶部张力、上弯段最大弯矩、上弯段最大张力、托管架尾端最大/最小分离距离、下弯段最大弯矩、下弯段最大张力和底部张力等。分析结果应按照现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 中组合荷载准则-荷载控制条件对管道进行校核，或按照荷载条件指导性说明选择合适的组合和准则对管道进行强度校核。

5.3.6 在位分析要点应适当考虑钢管初应力和夹层材料脱空等初始缺陷，如根据实际工程的数据，选择初始缺陷；考虑设计温度时，如有可靠依据，可考虑温降作用，也可从保守角度，按全域管道均匀升温考虑；在海床相互作用中，宜考虑海床对管道的轴向摩擦力作用。

5.3.7 中空夹层复合海底管道可在复合管道自由膨胀和两端约束两种工况下进行分析，分别获得管端膨胀量和虚拟锚固作用下的管道轴向荷载。分析结果可按照现行行

业标准《海底管道系统》SY/T 10037 中组合荷载准则-荷载控制条件对管道进行校核，或按照荷载条件指导性说明选择合适的组合和在准则对管道进行强度校核。

5.3.8 对于安装分析，根据项目要求进行参数分析时，参数通常包括但不限于：托管架：刚性与柔性托管架、辊轮等模拟；张紧器张力；海床。

对于在位分析，根据项目要求进行锚固件间隔等关键参数分析，结果为复合管道设计提供技术依据。

6 管道承载力计算

6.1 一般规定

6.1.1 当有可靠计算依据时，也可采用其他夹层材料。

6.2 压（拉）、弯、扭复合受力承载力计算

6.2.2 本条文未计入荷载长期作用影响，长期荷载作用下中空夹层复合海底管道结构的轴心受压承载力计算见本规程 6.3.1 条。

6.2.7 中空夹层复合海底管道结构受压、扭荷载共同作用时，可视为钢管混凝土桁式混合结构的单根弦杆计算其承载力。应按现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 的 6.2.9 条第 9 款计算。

6.2.8 本条文参考了现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037，中空夹层复合海底管道结构的抗弯承载力和截面受压承载力按本规程的规定计算，其他参数按照现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 确定。

6.2.9 外压作用下中空夹层复合海底管道结构压溃载荷计算中，材料参数采用理想弹性假设，通过 3000 组数值计算结果拟合而来，相关结果通过海洋工程装备检测试验技术国家工程实验室深水高压舱实验检验。巴西海洋工程技术研究院对该公式的有效性进行了实验验证，检验结果得到法国船级社等认可。

6.2.10 外压作用下中空夹层复合海底管道结构压溃传播载荷计算中，材料参数采用理想弹性假设，通过 1500 组数值计算结果拟合而来，相关结果通过海洋工程装备检测试验技术国家工程实验室和巴西海洋工程技术研究院深水高压舱检测。检验结果得到法国船级社等认可。

6.4 抗疲劳设计

6.4.2 对有疲劳验算要求的中空夹层复合海底管道结构，可将其视作只有外钢管的空钢管，参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定，采用该标准中基于外钢管名义应力幅的疲劳验算方法及其疲劳强度 S-N 曲线。其中，S-N 曲线的计算宜考虑钢管多向应力状态的影响按式（6.4.2）修正。通过开展试验和有限元模拟，基

于损伤力学和扩展有限元法的疲劳寿命分析，以裂纹萌生寿命作为疲劳设计依据，则疲劳寿命设计公式为： $S^3N=7.03\times 10^{12}$ 。

通过有限元模型对带内压的空钢管进行应力分析，得到预计裂纹萌生处的应力。计算结果表明，应力分量 S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 均接近于 0，可忽略不计。故有：

$$\text{平均正应力 } \sigma_H = (S_{11} + S_{22} + S_{33}) / 3;$$

$$\text{von Mises 应力 } \sigma_{eq} = [0.5(S_{11} - S_{22})^2 + (S_{22} - S_{33})^2 + (S_{33} - S_{11})^2]^{0.5};$$

$$\text{应力三轴度 } T = \sigma_H / \sigma_{eq}.$$

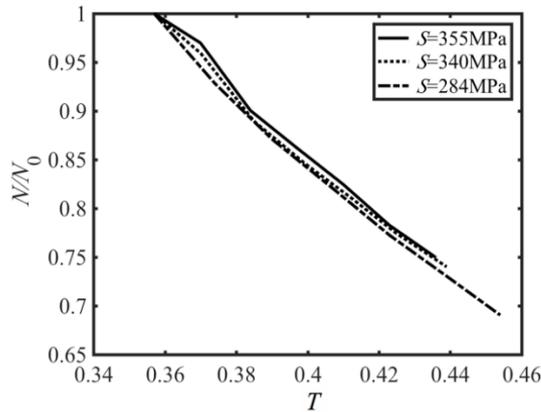


图 4 裂纹萌生相对寿命-应力三轴度有限元模拟结果

根据图 4，可认为应力三轴度 T 对疲劳寿命 N 的影响与应力幅 S 关系较小，因此在考虑 T 对 N 的折减时，影响系数可以只包含 T 。根据上述数据，进行一定保守考虑，拟定此系数如本规程中式 (6.4.2)，此系数所确定的曲线如图 5 所示。

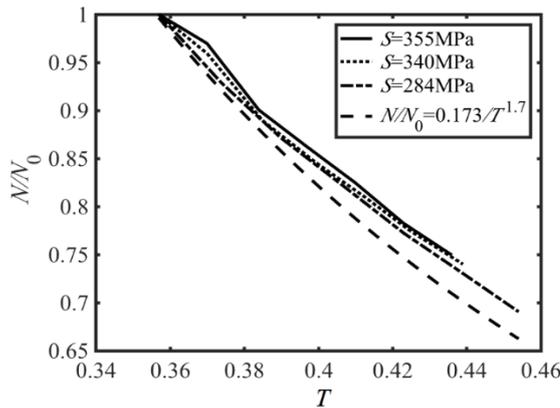


图 5 应力三轴度对疲劳寿命的折减曲线

结合 $S-N$ 设计曲线，便得到空钢管的 $S-N-T$ 设计曲面：

$$S^3NT^{1.7} = 1.21 \times 10^{12} \quad (3)$$

该曲面如图 6 所示。

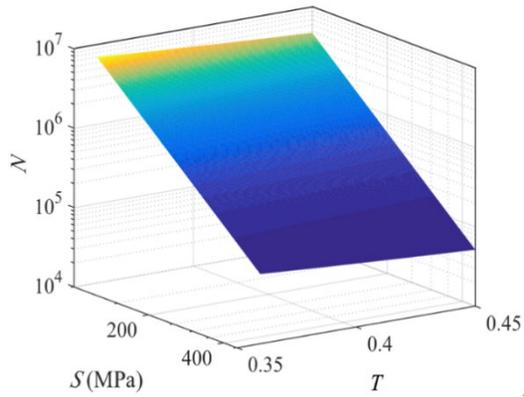


图 6 空钢管的 $S-N-T$ 设计曲面

在中空夹层复合海底管道进行抗疲劳设计时，还建该综合考虑英国标准《Guide of fatigue design and assessment of steel products》BS 7608 和《Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures》BS 7910 的要求进行基于断裂力学方法的断裂设计。给出的疲劳和断裂设计应满足现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 的相关要求。

7 防护设计

7.1 防腐蚀设计

7.1.1 本条文参考了现行团体标准《钢管混凝土桁式混合结构技术规程》T/CECS 785 中的有关规定。关于局部腐蚀或点腐蚀可等效为均匀腐蚀，钢管壁厚损失取局部腐蚀或点腐蚀区域壁厚损失的最大值。

7.1.2 工程中空夹层复合海底管道的外管受腐蚀，与钢管混凝土的外管受腐蚀情况相同，故可参考现行国家标准《钢管混凝土混合结构技术标准》GB/T 51446 计算其外管的等效参数。中空夹层复合海底管道结构的相关参数，应用腐蚀后外管的等效参数计算。

7.2 抗低温设计

7.2.2 在冻融环境下，中空夹层复合海底管道的夹层混凝土会发生材料劣化，但轴压及围压会影响材料劣化程度。研究表明，当轴压比大于 0.4 且围压比小于 0.03 时，压力可能对冻融后混凝土的抗压强度不利，应进行进一步验算。

7.3 抗撞击设计

7.3.1 考虑到实际海洋工程中存在船锚等落物对中空夹层复合海底管道结构产生撞击的情况，当存在此风险时应进行抗撞击设计。

7.3.2 为减少撞击荷载对中空夹层复合海底管道结构可能造成的损伤和破坏，在设计阶段应考虑撞击荷载作用。已有的研究表明，当中空夹层复合海底管道结构的截面空心率大于 0.8 时，其耐撞能力明显降低，故在本条中规定对于考虑撞击荷载作用的中空夹层复合海底管道结构的截面空心率应小于 0.7。

已有的研究表明，中空夹层复合海底管道受横向撞击作用时，在材料、几何、撞击速度等各参数的变化下，其动力放大系数仅在 1.0 上下的小范围（约 0.94–1.04）内浮动，故取 1.0。

7.3.3 本条文参考了挪威船级社标准 DNV RP F107 中的有关规定。落物在水下下落受到重力与阻力的作用，落物的下落速度先缓慢上升然后稳定。一般在水深 50 米以下可认为落物下落速度已达到稳定。

7.3.4 本条文参考了挪威船级社标准 DNV RP F107 中对落物撞击能量计算的有关规定。水下落物的撞击能量包括落物本身的动能和带动的周围水的动能。

7.4 抗爆炸设计

7.4.1 本条文参考挪威船级社标准《Risk assessment of pipeline protection》 DNV-RP-F107。中空夹层复合海底管道结构在爆炸荷载下，外管和夹层混凝土能够吸收能量从而达到保护内管的效果。因此从运输油气的正常使用情况考虑，以内管凹陷变形作为判断标准。另外，当爆炸距离较大时，中空夹层复合海底管道结构的破坏形式主要为整体弯曲，应考虑整体受弯的影响。

7.4.2 受水下爆炸作用的中空夹层复合海底管道结构通过采用损伤指数来计算爆炸作用后的剩余承载力，通过有限元研究，回归得到了中空夹层复合海底管道损伤指数。进行中空夹层复合海底管道结构的抗爆炸设计时，应考虑一次荷载和二次荷载。设计中可按先施加一次荷载，结构稳定后再施加二次荷载的顺序计算。

进行中空夹层复合海底管道结构的抗爆炸设计时，一次冲击波荷载可简化为指数衰减模式：

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad (1)$$

$$P_m = \frac{52.76}{Z_b^{1.13}} \quad (2)$$

$$\theta = 0.084 W_b^{1/3} \cdot Z_b^{0.23} \quad (3)$$

式中： P_m ——水下爆炸峰值压强（MPa）；

θ ——水下爆炸冲击波衰减曲线时间常数（ms）；

W_b ——水下爆炸点炸药当量（kg）；

Z_b ——水下爆炸点的比例爆距（ $m \cdot kg^{-1/3}$ ），按 6.3.3 条计算。

进行中空夹层复合海底管道结构的抗爆炸设计时，需要考虑气泡脉动带来的二次荷载，气泡脉动可按式（4）计算，气泡诱导的压力荷载可按式（5）计算：

$$\left(\frac{C-\dot{R}}{R}+\frac{d}{dt}\right)\left[\frac{R^2}{C}+\left(\frac{1}{2}\dot{R}^2+\frac{v^2}{4}+H\right)\right]=2R\dot{R}^2+R^2\ddot{R} \quad (4)$$

$$p(\mathbf{r},t)=-\rho_w\frac{R^4\dot{R}^2}{2|\mathbf{r}|^4}+\rho_w\frac{2R\dot{R}^2+R^2\ddot{R}}{|\mathbf{r}|}+P_a \quad (5)$$

式中： C ——水中机械波波速（m/s）；

R ——气泡半径（m）；

t ——时间（s）；

v ——气泡相对于周围流场的迁移速度（m/s）；

H ——气泡表面焓的差值（m²/s²）；

p ——气泡诱导压力荷载压强（Pa）；

\mathbf{r} ——爆炸中心到流场中任意一点的矢径（m）；

ρ_w ——水的密度（kg/m³）；

P_a ——静水压压强（Pa）。

8 制造、安装和验收

8.4 验收

8.4.3 本条文参考了现行行业标准《海底管道系统》SY/T 10037 中的有关规定。

附录 A 钢与混凝土的界面粘结强度测试

A.0.2 钢板混凝土试件由混凝土块、钢板以及钢板顶部两端的翼缘板组成。使用侧压力加载装置对钢板混凝土试件施加压力，其包括两块加载板以及若干拉力传感器、加载螺杆和加载螺母，两块加载板分别贴设于混凝土块与钢板平行的一侧，若干加载螺杆均匀设置于加载板的两端且位于翼缘板的外侧，通过旋紧或旋松加载螺母对钢板混凝土试件施加或释放侧压力。钢板混凝土试件及其侧压力加载装置如图 7 所示。

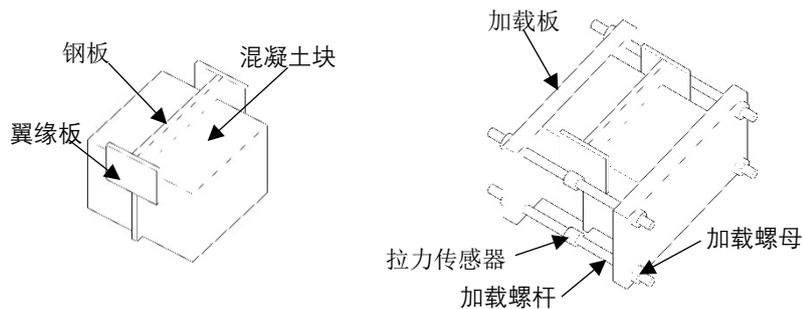


图 7 钢板混凝土试件及其侧压力加载装置

钢管混凝土试件由钢管、核心混凝土以及固定于钢管顶端和底端的加强环组成。使用围压力加载装置对钢管混凝土试件施加压力，其包括设置于加强环之间的预应力布、固定于预应力布两端的刚性锚具，以及连接于刚性锚具之间的若干加载螺栓，通过旋紧或旋松所述加载螺栓对所述钢管混凝土构件施加或释放围压力。钢管混凝土试件及其围压力加载装置如图 8 所示。

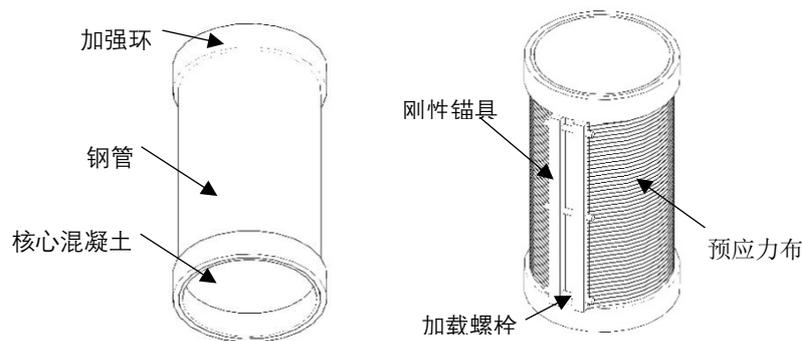


图 8 钢管混凝土试件及其围压力加载装置

A.0.3 试验测试应根据如下流程开展：

- 1 选取测试用钢板及钢管，测量两者的表面粗糙度以及钢管的初始几何变形。
- 2 制作钢板混凝土构件和钢管混凝土试件。

3 钢板混凝土试件顶部钢板和翼缘板所在平面作为加载端，进行钢板混凝土试件推出滑移试验，得到第一组结果；钢管混凝土试件顶端核心混凝土平面作为加载端，进行钢管混凝土推出滑移试验，得到第二组结果。第一组结果为钢板混凝土试件中钢板与混凝土之间的化学胶结力与微观咬合力的总和；第二组结果为钢管混凝土试件中钢管与其内核心混凝土之间的化学胶结力、微观咬合力与宏观咬合力的总和。

4 钢板混凝土推出滑移试验分为：有、无侧压力的钢板混凝土推出滑移试验；钢管混凝土推出滑移试验分为：有、无围压力的钢管混凝土推出滑移试验。

5 钢板混凝土推出滑移试验中，在与钢板接触的混凝土外表面沿推出方向依次布设若干应变片，用于计算钢板与混凝土之间的界面力的分布；钢管混凝土推出滑移试验中，在钢管的外表面沿推出方向依次布设若干应变片，用于计算钢管与其内核心混凝土之间的界面力的分布。

附录 B 复合管道夹层材料长期性能测试

B.0.1 本附录中测试方法以复合管道夹层混凝土收缩、长期荷载作用下的徐变和轴心受压力学性能三个方面的测试为例。

B.0.2 针对素混凝土和复合管道中的夹层混凝土的混凝土收缩试验的混凝土收缩试验装置如图 9 所示。

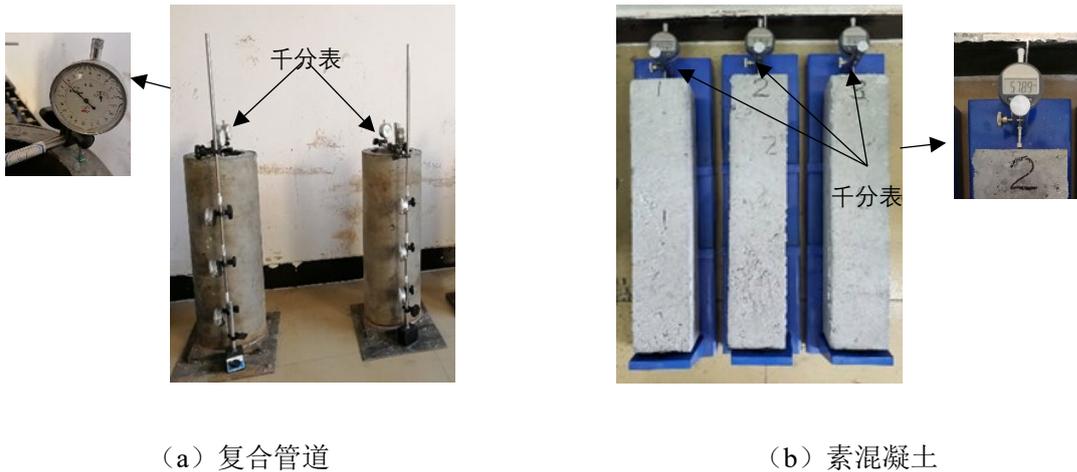


图 9 收缩试验装置

B.0.3 长期荷载通过上下承力板对管道进行施加，使用螺杆和高压螺栓将承力板连接在一起，通过调整高压螺栓来控制施加荷载大小。管道的徐变通过布置在顶部的千分表来进行测量记录。长期荷载作用下的徐变测量装置如图 10 所示。

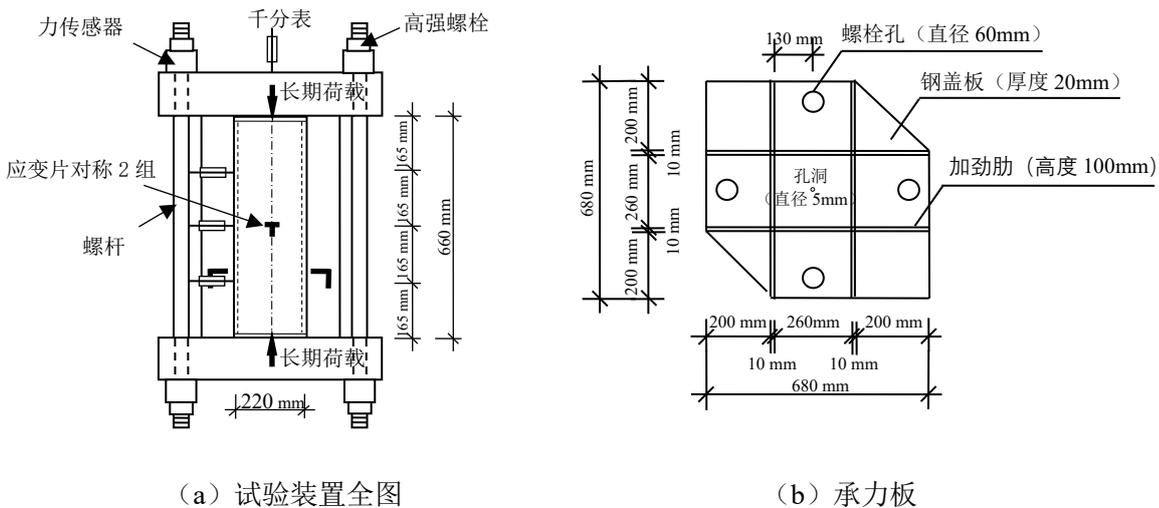


图 10 长期荷载试验钢部件设计图

B.0.4 本条文中的轴心受压力学性能试验装置通过液压试验装置对复合管道进行单调压缩试验，在此过程中通过力传感器和 LVDT 分别监测荷载值和轴向位移量，并通过配套的数据采集系统记录试验数据。复合管道轴心受压试验加载装置如图 11 所示。

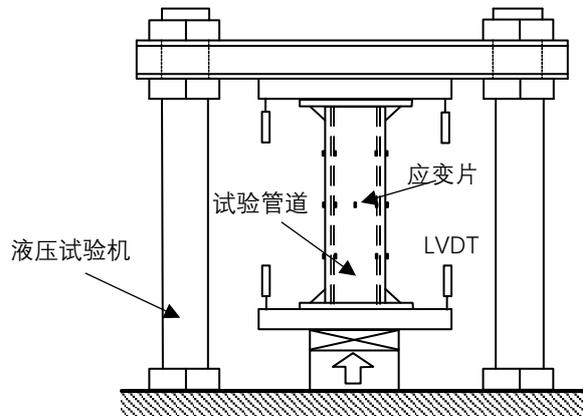


图 11 轴压试验装置

B.0.5 本条文中，试验程序应符合如下要求：

1 测试纵向收缩时，在混凝土硬化之后，在混凝土的端部应在表面设置小塑料贴片并采用位移传感器顶住塑料片来进行纵向收缩的测量。测试横向收缩时，沿纵向宜均匀设置三个孔，用小网封住浇混凝土，在硬化之后采用同样的传感器顶住来进行横向收缩的测量。位移传感器应采用分度值为 0.001mm 的千分表。

2 长期荷载作用下的徐变测试，在混凝土养护到 28 天时即开始对试件进行长期荷载作用下的变形测试。在试件顶部和底部分别设置两块承力钢板，并在其上沿斜对角方向焊有加劲肋，以保证钢承力板有足够的刚度。每块承力板上各设有螺栓孔，用来穿过对试件施加长期荷载的钢拉杆。管道的轴向变形由千分表进行量测，同时还在外层钢管上粘贴纵、横向应变片，以期校核位移计测量结果。

3 长期荷载施加采用对称加载办法，先将管道进行几何对中，然后依次拧紧各钢拉杆螺丝杆上的螺母，同时观测设置在试件上的千分表和纵向应变片读数的变化，保证管道在加载过程中始终处于轴心受压状态。当各杆提供的拉力之和达到控制荷载值时，结束加载。为了保证管道所受荷载值的恒定，需不定期通过拧紧拉杆上的螺母对管道进行荷载补加。试验环境为室内，在试验期间，记录室内温度和湿度的变化。

4 轴心受压力学性能试验，对管道进行一次加载试验。在每个管道的中间截面处钢板的外侧贴纵向及横向各一电阻应变片，以测量应变。在柱端设置 2 个电测位移计以

量测试件纵向变形，变形数据均采用计算机自动采集。试验采用分级加载制，弹性范围内每级荷载为预计极限荷载的 $1/10$ ，钢管压区纤维开始屈服时，每级荷载约为预计极限荷载的 $1/15$ 。每级荷载的持荷时间为 1~2 分钟，当试件接近破坏时，慢速连续加载。对恒定长期荷载作用下的试件，在变形测试结束后，先卸掉施加长期荷载的装置，随后再进行一次加载试验。

附录 C 复合管道结构疲劳性能测试

C.0.2 本条文第 2 款中复合管道疲劳试验构件如图 12 所示。

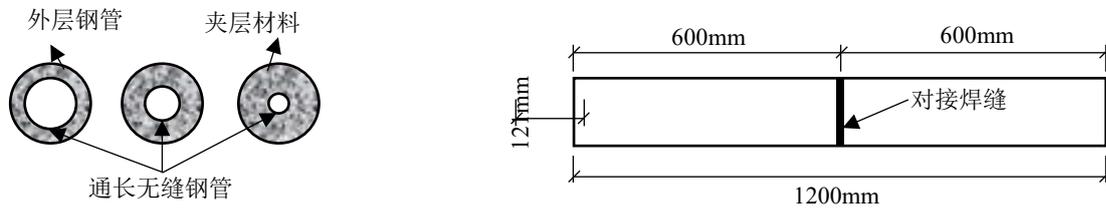


图 12 疲劳试验复合管道

本条文第 2 款中疲劳试验机通过分配梁将荷载施加在固定在复合管道中间的两个夹具上，进而对复合管道施加疲劳荷载；两端夹具则与支座进行组合对复合管道起到支撑和稳定作用。四点弯曲疲劳试验加载装置如图 13 所示。

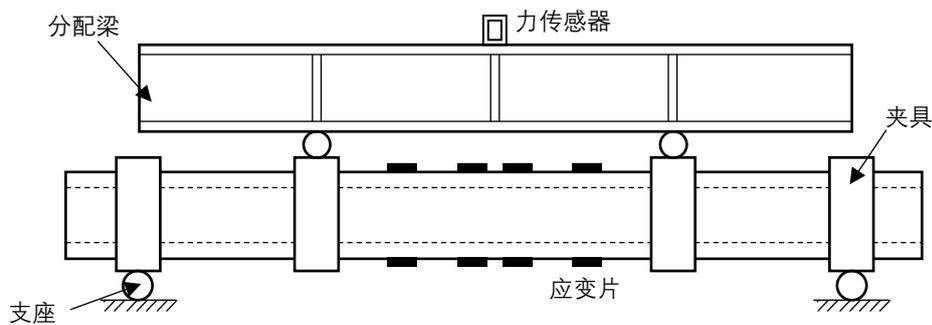


图 13 四点弯曲疲劳试验装置

C.0.3 本条文第 4 款应满足，通过力传感器测量试验机施加在分配梁上的荷载，进行跨中弯矩的计算；通过贴在外层钢管外表面的应变片，测量四点弯曲纯弯段的钢材应变，通过应变可计算应力，结合抗弯刚度可进行跨中弯矩的计算，结合泊松比可进行管内压力的计算。

附录 D 力和腐蚀共同作用下钢管材料性能测试

D.0.2 本条文中试验装置应满足如下要求：

1 钢管材料恒载荷应力腐蚀试验装置由应力加载单元和腐蚀环境模拟单元组成，其中，腐蚀环境模拟单元可以实现周期浸润环境模拟以及全浸润环境模拟。

2 应力加载单元包括钢管材料试件、卧式加载反力架、力传感器、n形夹具、加载螺杆、导向套筒和加载螺母；两个n形夹具通过销钉分别与钢管材料试件的两端连接固定，加载螺杆穿过内置于卧式加载反力架中的导向套筒并与n形夹具的另一端连接。卧式加载反力架外侧的一个传力螺杆上依次套设一个力传感器和一个加载螺母，另一个加载螺杆上仅套设一个加载螺母并将其固定。通过旋紧设有力传感器一侧的加载螺母，对所述钢管材料试件进行拉应力的加载，加载荷载由所述力传感器读出。应力加载单元如图1所示。

3 所述腐蚀环境模拟单元由总控系统、容纳有腐蚀溶液的溶液补给箱、液压升降台以及腐蚀试验槽和加热灯组组成；加载完成后的钢管材料试件悬挂在腐蚀试验槽中，n形夹具实现对腐蚀试验槽侧壁的跨越，腐蚀试验槽通过导管与溶液补给箱连通，溶液补给箱放置在液压升降台上，由总控系统控制液压升降台进行周期性的升、降以及加热灯组进行周期性地关、开，使腐蚀溶液周期性地流入、流出腐蚀试验槽，实现钢管材料试件在腐蚀溶液浸润、高温干燥之间的周期性循环。当控制腐蚀试验槽内充满腐蚀溶液且不再流出时，即可模拟全浸润环境。包含应力加载单元和腐蚀环境模拟单元的试验装置如图14所示。

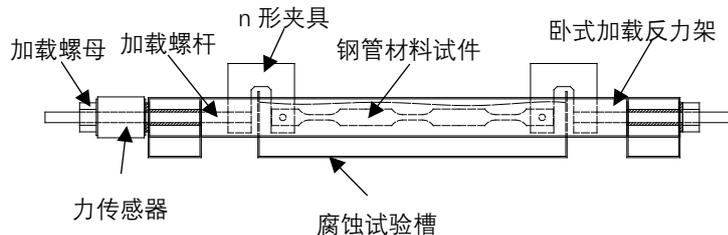


图 14 应力加载单元

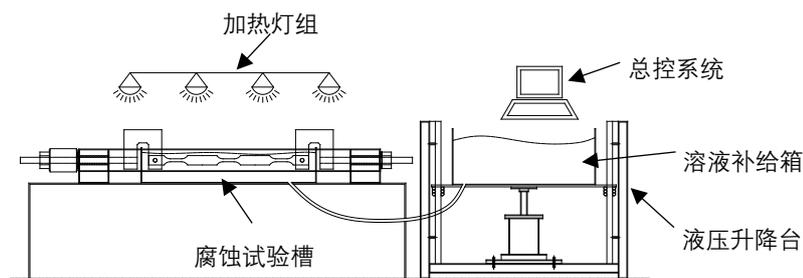


图 15 钢管材料恒载荷应力腐蚀试验装置

D.0.3 本条文中试验程序如图 15 所示，应具体包括：

1 试件准备：从钢管上切取哑铃型试件，可采用单个试件或多个试件串联形式。试件两端钻圆孔，用于与 n 形夹具连接。

2 装置组装：将卧式加载反力架、腐蚀试验槽、溶液补给箱和加热灯组摆放定位后，调整液压升降台的高度，使得腐蚀试验槽内无腐蚀溶液。安装所述导向套筒及加载螺杆，将与钢材试件相连的 n 形夹具与加载螺杆连接固定。在一侧加载螺杆的外侧安装力传感器以及加载螺母，另一侧加载螺杆外侧安装加载螺母固定。

3 加载：保持液压升降台的高度不变并保持加热灯组关闭；旋紧设有力传感器一侧的加载螺母，对钢管材料试件施加拉力，通过力传感器实时监控荷载值，加载至设计荷载后，固定设有力传感器一侧的加载螺母使钢管材料试件达到恒载荷状态。

4 腐蚀试验：在所述总控系统中设定浸润周期；其中，浸润阶段：总控系统控制液压升降台上升、加热灯组关闭，腐蚀溶液流入腐蚀试验槽中，使处于拉应力作用下的钢管材料试件浸润在腐蚀溶液中；干燥阶段：总控系统控制液压升降台下降至最低、加热灯组开启，腐蚀溶液流回溶液补给箱中，使处于拉应力作用下的钢管材料试件干燥；全浸润：总控系统控制液压升降台上升至高位，使腐蚀试验槽内充满腐蚀溶液且不再回流。通过上述操作实现钢管材料试件在周期浸润条件、全浸润条件下的恒载荷应力腐蚀试验。

5 材料性能试验：腐蚀试验结束后，若试件断裂，记录断裂发生时间；若未断裂，称取腐蚀过程失重并进行钢材单轴拉伸试验，检验钢管材料在力与腐蚀共同作用后的材料性能变化。

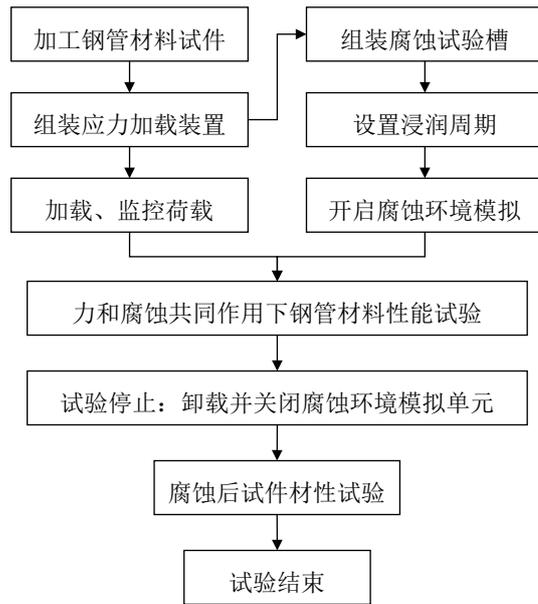


图 16 测试流程