

ICS

CCS 点击此处添加 CCS 号

DB 44

广东省地方标准

DB XX/T XXXX—XXXX

公路钢壳混凝土沉管隧道结构设计规范

Specifications for design of steel shell concrete structural of highway immersed tunnels

(送审稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

广东省市场监督管理局 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 符号	2
4.1 作用和作用效应设计值	2
4.2 计算指标	3
4.3 几何参数	3
4.4 计算系数及其它	4
5 基本规定	4
6 材料	5
6.1 钢板	5
6.2 混凝土	5
6.3 钢筋	6
6.4 牺牲阳极金属	6
6.5 止水带	6
7 结构设计	7
7.1 一般规定	7
7.2 总体设计	7
7.3 管节构造要求	8
7.4 钢壳构造要求	8
7.5 加劲肋和连接件构造要求	9
7.6 受压翼缘局部稳定	10
7.7 组合构件脱空要求	10
7.8 防火设计	10
7.9 最终接头	11
7.10 运营期监测	11
8 计算与分析	11
8.1 一般规定	11
8.2 作用分类	11
8.3 组合结构内力计算	12
8.4 结构计算	12
8.5 抗震验算	18
9 耐久性设计	19
9.1 一般规定	19

9.2	表面预处理	19
9.3	涂层保护	19
9.4	阴极保护	20
10	舾装件设计	22
10.1	一般规定	23
10.2	计算及构造要求	23
附录 A (资料性)	牺牲阳极安装后钢壳阴极保护电位检测	24
附录 B (资料性)	阳极检验项目、频次和技术要求	26
附录 C (资料性)	牺牲阳极的数量和使用年限核算	28
附录 D (资料性)	牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座接触电阻	30
附录 E (资料性)	钢壳混凝土管节检验要求	32
附录 F (资料性)	冲击映像仪选用要求及检测流程	33
附录 G (资料性)	中子法检测仪选用要求及检测流程	35

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由广东省交通运输标准化技术委员会公路工程分技术委员会（GD/TC 133/SC1）归口。

本文件起草单位：深中通道管理中心、中交公路规划设计院有限公司、清华大学、上海市隧道工程轨道交通设计研究院、中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司。

本文件主要起草人：

引 言

近年来，我国沉管隧道建设发展迅猛，沉管结构型式选择多样化，编制规范性文件来指导工程设计尤为迫切。本文件是在深中通道沉管隧道前期研究和勘察设计阶段尤其是工程建设相关科研系列成果及广泛征求意见的基础上，充分吸收国内外近期沉管隧道技术成果，参考相关标准制定的。

公路钢壳混凝土沉管隧道结构设计规范

1 范围

本文件规定了公路钢壳混凝土沉管隧道结构的材料、结构、计算与分析、耐久性、舾装件的设计要求。

本文件适用于新建公路双层钢板-混凝土组合结构沉管隧道。单孔四车道或以上、受力条件复杂的沉管隧道可采用钢壳混凝土结构。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB 1499.1 钢筋混凝土用钢第 1 部分：热轧光圆钢筋
- GB 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
- GB 4948 铝-锌-铟系合金牺牲阳极
- GB 7387 船用参比电极技术条件
- GB 7788 船舶及海洋工程预计屏涂料通用技术条件
- GB 13788 冷轧带肋钢筋
- GB 18173.2 高分子防水材料 第2部分：止水带
- GB 28376 隧道防火保护板
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB 50396 钢管混凝土结构技术规范
- GB/J 107 混凝土强度评定标准
- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 3003 耐火材料 陶瓷纤维及制品
- GB/T 522 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 5782 六角头螺栓
- GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉
- GB/T 50081 普通混凝土力学性能试验方法
- GB/T 51318-2019 沉管法隧道设计标准
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG 2232 公路隧道抗震设计规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T D64-01 公路钢混组合桥梁设计与施工规范
- JTG/T 3371-01-2022 公路沉管隧道设计规范
- JGJ/T 380 钢板剪力墙技术规程

JTS 153-3-2007 海港工程钢结构防腐技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钢壳混凝土管节 Composite Steel-concrete Element

采用双层钢板混凝土组合结构的管节。

3.2

钢壳 Steel Shell

钢壳混凝土管节的内、外侧钢面板。

3.3

钢隔板 Steel Diaphragm

钢壳混凝土结构中连接内、外侧钢板并将混凝土隔断的钢板。

3.4

加劲肋 Stiffener

在主要受力钢板单侧或双侧规则布置的板件，用以提高构件局部稳定并传递集中力。

3.5

抗剪连接件 Shear Connector

设置在钢板-混凝土界面，用于传递界面剪力并使钢板与混凝土连接成为受力整体的构件。

3.6

型钢连接件 Shaped Steel Shear Connector

以T型钢、角钢等为主体的抗剪连接件。

3.7

组合桁架抗剪机制 Composite Truss Anti-shear Mechanism

混凝土作为斜压杆，钢隔板作为斜拉杆的桁架抗剪机制。

3.8

浇筑脱空 Casting Imperfection

钢壳混凝土组合结构因混凝土浇筑不密实而产生的顶面板下方脱空现象。

3.9

推出式最终接头 Push Out Final Joint

在预制场内与管节一体化预制成型，沉放到位后从嵌套管节中逐步顶推完成沉管隧道贯通的一种连接结构。

3.10

整体吊装式最终接头 Integral Lifting Final Joint

在工厂内预制成型，采用起重吊一次吊装到位完成沉管隧道贯通的一种连接结构。

4 符号

4.1 作用和作用效应设计值

M ——弯矩；

N ——轴向力；

V ——剪力；

S ——作用(或荷载)效应(其中汽车荷载应计入冲击系数)的组合值；

4.2 计算指标

C_c ——抗弯设计中受压混凝土部分压力；

C_s ——抗弯设计中受压翼缘板压力；

C_w ——抗弯设计中受压横隔板压力；

f_c ——混凝土抗压强度设计值；

f_s ——钢材强度设计值；

f_t ——抗剪桁架机制在横隔板中产生的斜向拉应力；

f_{vud} ——抗剪桁架模型中混凝土斜压杆的剪切设计强度；

M_u ——钢壳组合构件极限抗弯承载力；

n_i ——区段*i*内连接件的个数；

N_{cu} ——钢壳组合构件轴向极限抗压承载力；

N_{tu} ——钢壳组合构件轴向极限抗拉承载力；

ρ_w ——受拉面板钢材率；

R ——构件承载力设计值；

T_s ——抗弯设计中受拉翼缘板拉力；

T_w ——抗弯设计中受拉横隔板拉力；

τ ——横隔板纯剪应力；

v_d ——钢与混凝土结合面上单位长度水平剪力流；

v_{di} ——区段*i*上单位长度纵向剪力流；

$V_{c,Ed}$ ——形成组合截面之后作用于组合构件截面的竖向剪力；

V_u ——钢壳组合构件总受剪最大承载力；

V_{truss} ——抗剪桁架机制受剪最大承载力；

V_{web} ——钢腹板纯剪机制受剪最大承载力；

$V_{incline}$ ——变截面梁斜向翼缘机制受剪最大承载力；

V_{uc} ——抗剪桁架机制中混凝土斜压杆受剪最大承载力；

V_{ut} ——抗剪桁架机制中纵横隔板拉杆受剪最大承载力；

V_{su} ——单个连接件的抗剪承载力；

4.3 几何参数

A_c ——横截面混凝土面积；

A_p ——纵隔板的截面积；

A_s ——横截面钢板面积；

A_{sC} ——受压翼缘板面积，需考虑加劲肋面积一起算入；

A_{sT} ——受拉翼缘板面积，需考虑加劲肋面积一起算入；

α_1 ——横隔板斜拉角；

α_2 ——纵隔板与水平轴间的夹角；

α_3 ——斜向翼缘钢板与水平轴的夹角；

b_c ——混凝土宽度；

\square_s ——截面高度；

\square_{sc} ——型钢连接件高度；

I_{un} ——组合构件的未开裂截面惯性矩；
 l_i ——连接件布置区段长度；
 L_c ——型钢连接件长度；
 θ ——混凝土斜压杆斜压角；
 S_A ——受拉侧或受压侧钢板对组合截面中和轴的面积矩；
 s_l ——纵隔板间距；
 s_t ——横隔板间距；
 s_{sc} ——型钢连接件间距；
 t_C ——受压翼缘板厚度；
 t_T ——受拉翼缘板厚度；
 t_W ——横隔板的厚度；
 t_{cp} ——与型钢连接件相连的母板厚度；
 t_{sc} ——型钢连接件腹板厚度；
 $t_{incline}$ ——斜向翼缘钢板厚度；
 x ——抗弯垂直截面混凝土受压区高度；
 y_C ——混凝土受压中心与受拉翼缘板中心的距离；
 y_{cw} ——受压横隔板中心与受拉翼缘板中心的距离；
 y_{sc} ——受压翼缘板中心与受拉翼缘板中心的距离；
 y_{tw} ——受拉横隔板中心与受拉翼缘板中心的距离；
 z ——混凝土受剪区高度，即压应力合力的作用位置到受拉钢板的形心之间的距离；

4.4 计算系数及其它

β ——混凝土强度图形系数；
 β_d ——尺寸效应对抗剪强度的影响系数；
 β_ρ ——钢材率对抗剪强度的影响系数；
 β_s ——斜压角对抗剪强度的影响系数；
 γ_0 ——结构重要性系数；
 k_m ——横隔板布置间隔对抗剪强度的影响系数；
 k_{cp} ——型钢连接件翼缘影响系数；
 k_s ——型钢连接件间距影响系数；
 k_\square ——型钢连接件尺寸系数；
 λ_t ——型钢连接件形状系数；

5 基本规定

- 5.1 钢壳混凝土沉管隧道结构设计使用年限、结构安全等级等相关设计标准应按《公路沉管隧道设计规范》（JTGT 3371-01—2022）第3章执行。
- 5.2 钢壳混凝土管节主体结构的设计使用年限应不小于100年。
- 5.3 钢壳混凝土沉管隧道应根据不同阶段的任务、目的与要求，分析项目具体特点，通过采取调查、勘测、试验等手段，全面、准确、真实地反映工程区域的建设条件。不同阶段调查与勘测的主要内容宜按《公路沉管隧道设计规范》（JTGT 3371-01—2022）第4.1.2条执行。
- 5.4 钢壳结构设计除应满足受力、变形、耐久性要求之外，尚应统筹考虑钢壳制造加工、混凝土浇筑、管节浮运和沉放、对接等工艺以及养护的有关要求。

- 5.5 钢壳混凝土管节应针对钢壳加工、混凝土浇筑、管节系泊、浮运、沉放、对接等施工工况和正常运营工况下的结构强度、变形、稳定性等进行计算分析。
- 5.6 钢壳混凝土管节应根据环境作用等级等因素，综合采用多种不同防腐设计，使建设期及运营期均满足耐久性设计要求。
- 5.7 钢壳混凝土管节宜选用常规建筑材料，管节主体结构钢材强度等级不宜低于 Q235、混凝土强度等级应不低于 C45。
- 5.8 钢壳结构设计应统筹考虑主体结构、舾装件等附属设施、机电设施及其他相关预留预埋设计。
- 5.9 外海钢壳混凝土沉管隧道可采取在钢壳制造完成后浇筑部分混凝土，进行高干舷浮运至干坞或者隧址区进行浮态浇筑。

6 材料

6.1 钢板

6.1.1 钢壳混凝土沉管隧道用钢板的强度等级宜符合表 1 的规定，钢板的技术要求应符合《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。

表1 钢壳混凝土沉管隧道用钢材的强度等级要求

构件或部位		钢材强度等级
钢壳混凝土管节	面板	不低于Q355
	横隔板	不低于Q355，且不超过Q390
	纵隔板	不低于Q235，且不超过Q390
	抗剪连接件	不低于Q235
	钢端壳	不低于Q355
	剪力键	不低于Q355
GINA 止水带、OMEGA 止水带压板、压条钢板		不低于Q235
钢端封墙、水密门等施工临时设施		不低于Q235

- 6.1.2 钢壳混凝土管节用圆柱头焊钉连接件，其技术要求应符合《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的规定。
- 6.1.3 焊接材料、锚栓应与主体钢材相匹配。
- 6.1.4 普通螺栓的性能等级参照《六角头螺栓》（GB/T 5782）不宜低于 5.6 级。
- 6.1.5 沉管隧道用钢材、焊钉、焊接、锚栓、螺栓的设计指标宜按《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定取用。
- 6.1.6 钢结构宜设置必要的腐蚀裕量，应采用联合防腐蚀措施。钢结构腐蚀裕量可按《水运工程结构耐久性设计标准》（JTS 153）的规定计算。
- 6.1.7 处于海水环境时，难以维护与更换的构件宜选用不锈钢或其他合金材料。

6.2 混凝土

6.2.1 钢壳混凝土管节用混凝土的强度等级宜符合表 2 的规定。

表2 钢壳混凝土管节用混凝土的强度等级要求

构件或部位	混凝土强度等级
钢壳混凝土管节主体结构	不低于 C45
压舱混凝土	不低于 C25
防锚层混凝土	不低于 C20

6.2.2 钢壳混凝土管节主体结构用混凝土应采用自密实混凝土，混凝土收缩率宜小于 2×10^{-4} 。

6.2.3 钢壳混凝土管节主体结构用混凝土的设计指标宜按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）的规定取用，其配合比等材料指标应通过专题研究确定。

6.3 钢筋

6.3.1 钢壳混凝土管节按构造要求配置的钢筋网可采用 HPB300 或冷轧带肋钢筋，其中 HPB300 钢筋的技术要求应符合《钢筋混凝土用钢第 1 部分：热轧光圆钢筋》GB1499.1 的有关规定，冷轧带肋钢筋的技术要求应符合《冷轧带肋钢筋》GB 13788 的有关规定。

6.3.2 管节接头处限位装置宜选用预应力钢绞线，其抗拉强度标准值应不小于 1860MPa，其技术要求应符合《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的规定。预应力钢绞线的设计指标宜按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定取用。

6.3.3 主体结构中墙横向连接钢筋可采用 HRB400，技术标准应符合《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB1499.2 的规定。

6.4 牺牲阳极金属

6.4.1 牺牲阳极金属应选用 Al-Zn-In（铝-锌-铟）阳极材料。

6.4.2 阳极金属与铁芯之间接触电阻应小于 0.001 欧姆。

6.4.3 在 80 欧姆-厘米电阻率海水中，牺牲阳极材料工作负电位应达到 -1.05V，其长期性能应做型式认可实验，具体成份及电化学性能应符合表 3 的规定。

表3 牺牲阳极金属成分及电化学性能要求

化学成分：%		电化学性能	
Zn	4.0~6.0	工作电位（海水中）：	≤1.05V
In	0.016~0.040		
Ti	≤0.03	工作电位（海泥中）：	≤1.00V
Si	0.05~0.4		
Fe	≤0.07	实际电容量（海水中）：	≥2500Ah/kg
Cu	≤0.003	实际电容量（海泥中）：	≥1500Ah/kg
Sn	≤0.02	-	-
其他总杂质	≤0.05	-	-
Al	余量	溶解状况：	产物易脱落，表面溶解均匀

6.5 止水带

6.5.1 沉管隧道用 GINA 止水带、OMEGA 止水带、M 止水带、充气止水带的技术要求应符合《高分子防

水材料 第 2 部分：止水带》（GB/T 18173.2）的有关规定。

6.5.2 止水带具体设计要求可按《沉管法隧道设计标准》（GB/T 51318-2019）第 14 章执行。

7 结构设计

7.1 一般规定

7.1.1 钢壳混凝土沉管隧道应按整体式管节设计，且采用双层钢板-混凝土组合结构。

7.1.2 沉管隧道管节应根据结构受力、管节预制、浮运、安装、干坞选址、工期、造价及环保等要求，并结合纵断面设计要求进行合理划分与布置。

7.1.3 隧道横断面布置及结构尺寸应根据建筑限界、运营维护设施、结构受力、浮运沉放等要求，统筹考虑主体结构、舾装件及预留洞室与预埋件等因素综合确定。

7.1.4 钢壳加工节段纵向长度应根据加工厂设备起重能力、场地大小、管节模数等因素综合确定。

7.1.5 管节钢壳结构受力分析应根据制造加工工艺和混凝土浇筑工艺对钢壳混凝土管节构件关键截面处的轴力、弯矩承载力和竖向剪力承载力进行验算。

7.1.6 钢壳混凝土管节自密实混凝土浇筑顺序宜为底板→侧墙+中墙→顶板，采用跳仓浇筑方式，浇筑范围宜左右两侧对称布置。

7.1.7 管节主体结构耐火等级应为一级，并按 RABT 标准升温曲线要求，耐火极限不低于 2h。在耐火极限时间内，管节钢壳表面温度应不大于 300℃。

7.1.8 管节主体结构设计应符合设计使用年限、使用功能的要求，并满足使用条件、结构类型、施工工艺、机械设备等要求。

7.1.9 管节接头的竖向剪力键宜成组设置于侧墙与中墙，宜采用钢剪力键，水平向剪力键宜利用结构底板压舱层设置混凝土剪力键，也可在结构底板或顶板设置钢剪力键或钢销。

7.1.10 沉管基槽、基础及回填应满足总体设计的基本要求，具体要求应按《公路沉管隧道设计规范》（JTG/T 3371-01）执行。

7.2 总体设计

7.2.1 沉管隧道位置宜选择在水文、河势稳定及河床或海床平缓地段，基槽底最大水深不宜大于 60m，且避免选择在可能引起震陷、液化、滑坡等地质灾害的地段。

7.2.2 沉管隧道位置应避免选择在可能引起震陷、液化、滑坡等地质灾害的地段。当无法满足时，应采取有效措施。

7.2.3 沉管隧道的平面线形应根据路线走向、地形、地质、水文、航道、水下障碍物、两岸构筑物等因素确定，尽量减少对既有设施影响，避让不良地质区段，其技术指标应符合《公路路线设计规范》（JTG D20）、《公路水下隧道设计规范》（JTG/T 3371）的规定。

7.2.4 沉管段的平面线形宜采用直线。当不满足时，应结合隧道功能、管节长度、基础形式、施工工艺等因素综合确定合理的平曲线半径。

7.2.5 隧道纵断面线形应根据水下地形、航道规划和两岸构筑物等情况确定，其具体技术指标应符合《公路路线设计规范》（JTG D20）及《公路水下隧道设计规范》（JTG/T 3371）等的规定。

7.2.6 隧道埋深应根据航道规划、水域设防要求最大冲淤包络线、航道维护疏浚要求、通航船只落锚深度等因素确定。

a) 隧道应埋设在规划航道底标高以下，并满足规划航道实施及隧道顶部防锚层铺设要求。

b) 管节顶部应埋置在冲刷包络线以下。当不满足或管节顶部局部高出现状河（海）床面时，应进行专题论证并经相关政府部门批准。

7.2.7 纵断面设计应统筹考虑竖曲线段的机电设备及交通工程设施安装高度、建筑限界、排烟、排水等要求，并与管节接头、最终接头位置相协调。

7.2.8 沉管隧道总体设计应满足沉管段主体结构、衔接段主体结构与运营设施之间协调合理的要求。

7.2.9 沉管浮运、沉放等相关技术要求应按《沉管法隧道设计标准》（GB/T 51318-2019）第10章执行。

7.3 管节构造要求

7.3.1 考虑钢壳管节内部焊接、检测等加工的有限空间需求，管节的顶板、底板厚度宜取行车孔净宽的 $0.08\sim 0.12$ ，一般不小于 1.00m 。具体尺寸应根据管节受力分析合理确定。

7.3.2 管节的侧墙厚度，宜取侧墙净高的 $0.16\sim 0.20$ ，一般不小于 1.00m 。具体尺寸应根据管节受力分析合理确定。

7.3.3 管节的中墙厚度宜取 0.80m 。具体尺寸应根据管节受力分析合理确定。

7.3.4 管节结构受力分析应符合第8章的相关要求。

7.4 钢壳构造要求

7.4.1 管节钢壳结构的内、外侧面板设计应满足下列构造要求：

- a) 面板厚度不宜小于 10mm ；
- b) 不同厚度的面板相接时，宜采用格室内部对齐的形式，钢壳的面板构造示意图1。

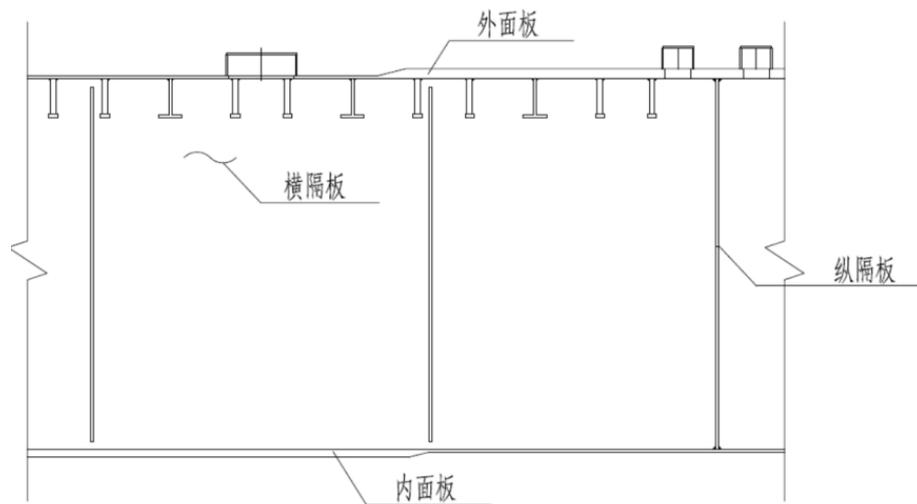
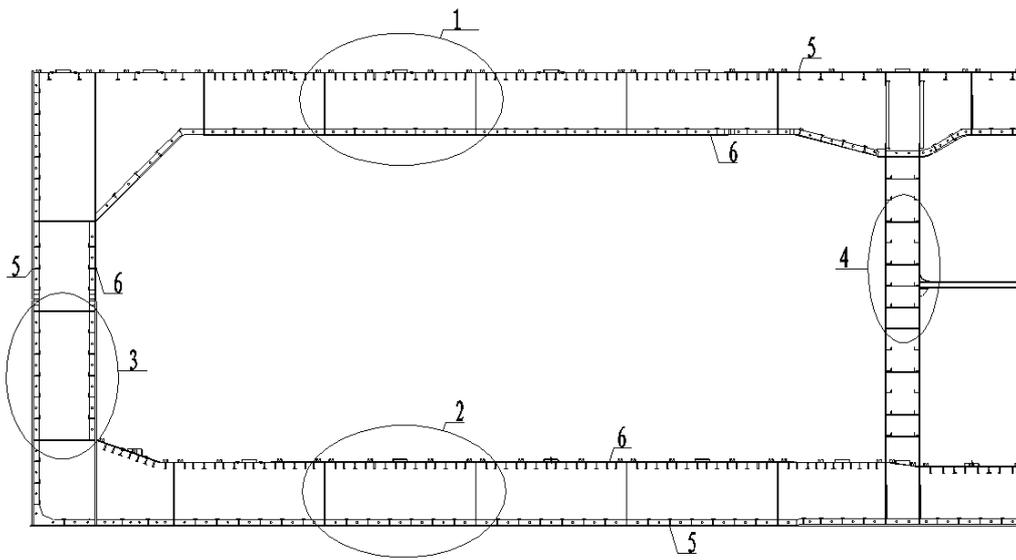


图1 钢壳的面板构造示意

7.4.2 管节钢壳结构的横、纵隔板设计应满足下列构造要求：

- a) 纵、横隔板的间距不宜大于 3.5m 。
- b) 纵、横隔板厚度不宜小于 12mm 。

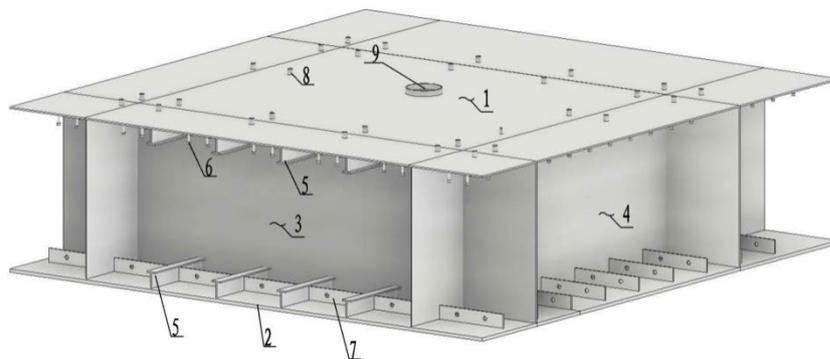
7.4.3 每个隔仓宜设置1个浇筑孔， $4\sim 10$ 个排气孔，浇筑孔宜设置在隔仓平面中心位置。钢壳混凝土管节的钢壳构造如图2、图3所示。



标引序号说明:

1-顶板; 2-底板; 3-侧墙; 4-中墙; 5-外侧面板; 6-内侧面板

图2 钢壳混凝土管节的钢壳构造



标引序号说明:

1-外侧面板; 2-内侧面板; 3-横隔板; 4-纵隔板; 5-纵向T肋; 6-焊钉;
7-横向扁肋; 8-排气孔; 9-浇筑孔

图3 隔仓一般构造

7.5 加劲肋和连接件构造要求

7.5.1 纵、横隔板宜设置板肋，加劲肋与面板的端部宜设置 3~5mm 的间隙。

7.5.2 侧墙的面板宜设置沿纵轴线方向的 L 型加劲肋和沿横断面方向的板肋，加劲肋间距宜取 0.50m~0.75m。

7.5.3 位于顶板和底板的面板应考虑短暂状况和持久状况的受力情况、施工便利性等因素，合理设置加劲肋和连接件，构造示意见图 4。其加劲肋和连接件的构造要求宜符合下列规定：

- 上层钢板不设置横向板肋、便于浇筑混凝土。
- 下层钢板宜考虑短暂状况的受力情况，设置横向板肋。
- 上层钢板的纵向加劲肋宜采用 T 型钢材，下层钢板的纵向加劲肋宜采用 L 型钢材，纵向加劲肋的间距宜取 0.50~0.75m。

- d) 为保证持久状况下受压面板的局部稳定性，其纵向加劲肋的间距不宜大于 0.50m，或设置焊钉连接件。当设置焊钉连接件时，可按《钢板剪力墙技术规程》（JGJ/T 380）中的相关规定执行，焊钉直径不宜小于 16mm、间距不宜大于 300mm。

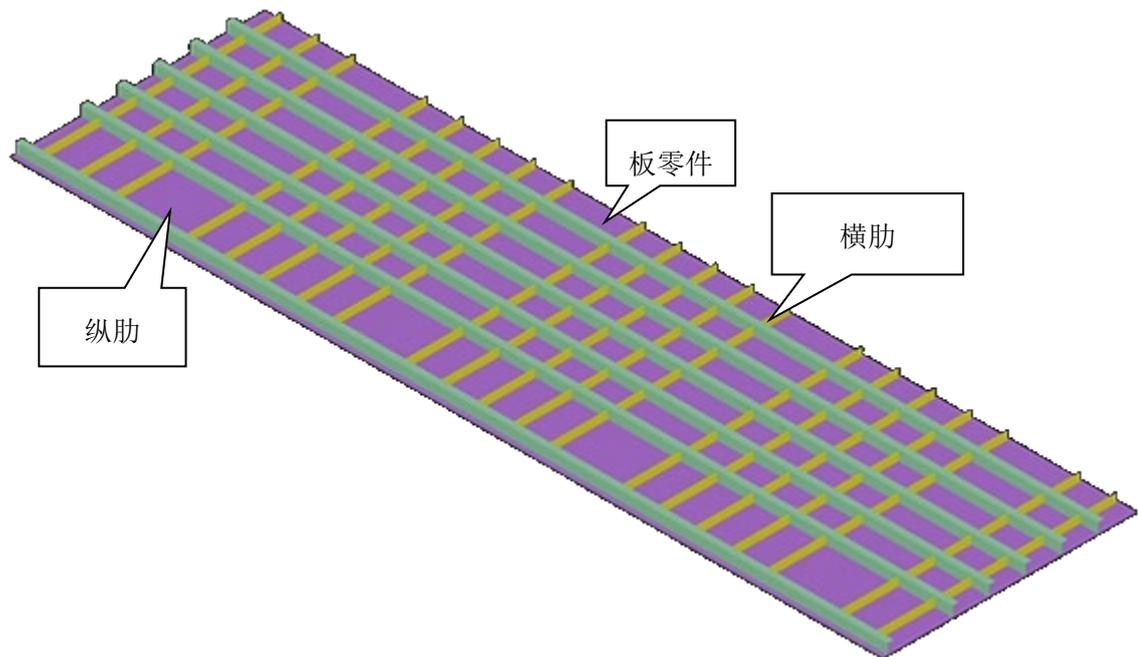


图4 钢壳结构构造示意图

7.5.4 顶板设置的 T 肋开孔间距宜为 30~50cm，开孔大小可取直径 60mm 腰圆孔，开孔位置宜位于 T 肋与面板连接位置。

7.6 受压翼缘局部稳定

7.6.1 钢-混凝土界面连接构造采用栓钉或其它抗拔可靠的型钢连接件时，应符合《钢板剪力墙技术规程》（JGJ/T 380）中的有关规定。

7.6.2 当采用钢板加劲肋提高受压翼缘的局部稳定性时，应考虑加劲肋拔出后的防屈曲承载能力，并采用数值分析或试验等方法验证。

7.7 组合构件脱空要求

7.7.1 钢壳组合构件中钢与混凝土间的脱空高度不宜大于 5mm，应针对底板顶和顶板顶进行分格脱空检测，分格尺寸可为 30cm×30cm。

7.7.2 钢壳管节分格脱空高度大于 5mm 时应注浆补强。注浆补强材料可采用环氧树脂，注浆补强材料的强度等级应不小于主体结构自密实混凝土的强度等级。

7.8 防火设计

7.8.1 隧道防火内衬保护应覆盖下列范围：

- a) 隧道顶板以及顶板下一定范围内的侧墙部分（含加腋）。
- b) 沉管隧道管节接头等部位。
- c) 安装隧道顶部风机、基本与应急照明灯具的预埋件。
- d) 照明、供电、通信、信号等电缆。

7.8.2 隧道防火内衬材料应符合下列要求：

- a) 应满足设计火灾热释放率与结构内耐火极限的要求。
- b) 防火板材料测试指标应满足《隧道防火保护板》（GB 28376）中的相关规定。
- c) 陶瓷纤维类防火材料应满足《耐火材料 陶瓷纤维及制品》（GB/T 3003）中的相关规定。

7.9 最终接头

7.9.1 最终接头结构型式应综合考虑接头位置、水文地质、结构特点、施工条件、装备能力、工期、造价等因素统筹确定。

7.9.2 最终接头可采用岸上最终接头与水中最终接头。水中最终接头可采用推出式最终接头、整体吊装式最终接头等构造型式。

7.9.3 最终接头位置和型式应根据建设条件、工期策划、施工工艺等选定。为做到止水可靠、风险最低，应尽可能选择水深浅、水流流向与流速基本稳定、泥沙含量少的区段实施。

7.10 运营期监测

7.10.1 应根据沉管隧道全寿命周期成本、使用功能和构造特点等要求，开展运营期的长期监测方案设计。

7.10.2 长期监测点应符合可维、可达、适于长期监测的要求。监测点数量应考虑有富裕，腐蚀严重的部位宜适当增加布置点。

7.10.3 运营期监测系统的设计使用年限应根据监测需要，并结合主体结构设计使用年限确定。

7.10.4 运营期监测系统应具有数据分析、安全预警、安全评估、损伤诊断、技术状况评定、专项评估等功能。

7.10.5 当采用新型结构和特殊工艺时，宜增加专项监测内容。

7.10.6 监测项目和频率等要求应按《公路沉管隧道设计规范》JTGT 3371-01 第 16 章执行。

7.10.7 耐久性监测项目应根据监测目的、对象、结构特点和环境特征等进行选择。

7.10.8 耐久性监测数据采集频次应能反映被监测结构的耐久性状态和劣化趋势，并满足监测数据分析与寿命评估的应用条件。监测数据采集方式应根据需要选择自动、人工或组合方式。

8 计算与分析

8.1 一般规定

应对钢壳混凝土管节结构构件及连接件进行下列计算：

- a) 应按承载能力极限状态的要求进行持久状况及偶然状况的构件承载力及钢混结合面抗剪连接件剪力验算。
- b) 应按正常使用极限状态的要求进行持久状况的构件应力、钢混结合面抗剪连接件剪力、构件变形验算。
- c) 应按短暂状况结构受力状态的要求进行施工期工况的应力验算。

8.2 作用分类

8.2.1 沉管隧道横断面静力计算采用的作用宜分为永久作用、可变作用和偶然作用。

8.2.2 沉管隧道计算的作用分类应符合表 4 的规定。

表4 作用分类

编号	作用分类	作用名称
1	永久作用	结构自重
2		压重混凝土
3		附加恒载
4		平均水位静水压力+全球海平面上升（海域）
5		竖向土压
6		侧向土压
7		侧墙负摩擦
8		混凝土收缩徐变
9		纵向不均匀地基刚度作用
10	可变作用	交通荷载
11		水位变化
12		梯度温度
13		波浪荷载
14		系缆力、沉放吊点荷载
15	偶然作用	沉船、船撞荷载
16		落锚荷载
17		火灾作用
18		极端高水位和波浪
19		爆炸荷载
20		地震荷载(MDE)

8.3 组合结构内力计算

8.3.1 承载能力极限状态连接件设计的作用应包括钢结构与混凝土形成组合截面之后的各种永久作用和可变作用，可不考虑混凝土收缩、徐变的影响。

8.3.2 采用型钢连接件为抗剪措施时，计算钢与混凝土结合面上的水平剪力流应按线弹性分析法，并假设钢梁和混凝土板完全组合进行计算，同时不考虑负弯矩区混凝土开裂。钢与混凝土结合面上单位长度水平剪力流 v_d 应按下式计算：

$$v_d = \frac{V_{c,Ed} S_A}{I_{un}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- $V_{c,Ed}$ ——形成组合截面之后作用于组合构件截面的竖向剪力；
- S_A ——受拉侧或受压侧钢板对组合截面中和轴的面积矩；
- I_{un} ——组合构件的未开裂截面惯性矩。

8.4 结构计算

8.4.1 持久状况设计应按承载能力极限状态的要求，对构件进行承载力验算。在进行承载能力极限状态计算时，作用效应应采用其组合设计值；结构材料性能采用其强度设计值。

8.4.2 构件的承载能力极限状态计算，应采用下列表达式：

$$\gamma_0 S \leq R \dots\dots\dots (2)$$

式中：

γ_0 ——结构重要性系数，按设计安全等级，一级、二级、三级分别取用1.1、1.0、0.9；抗震设计不考虑结构的重要性系数；

S ——作用效应(其中汽车荷载应计入冲击系数)的组合设计值；

R ——构件承载力设计值。

8.4.3 承载能力极限状态应按全塑性设计法进行验算，横断面设计应符合图5的流程要求。

- a) 构件截面抗轴力与弯矩的承载力验算时，承载构件应为顶底钢板、混凝土；
- b) 构件截面抗竖向剪力承载力验算时，承载构件应为横隔板、混凝土；
- c) 钢-混界面抗剪承载力验算时，承载构件应为抗剪连接件、纵隔板。

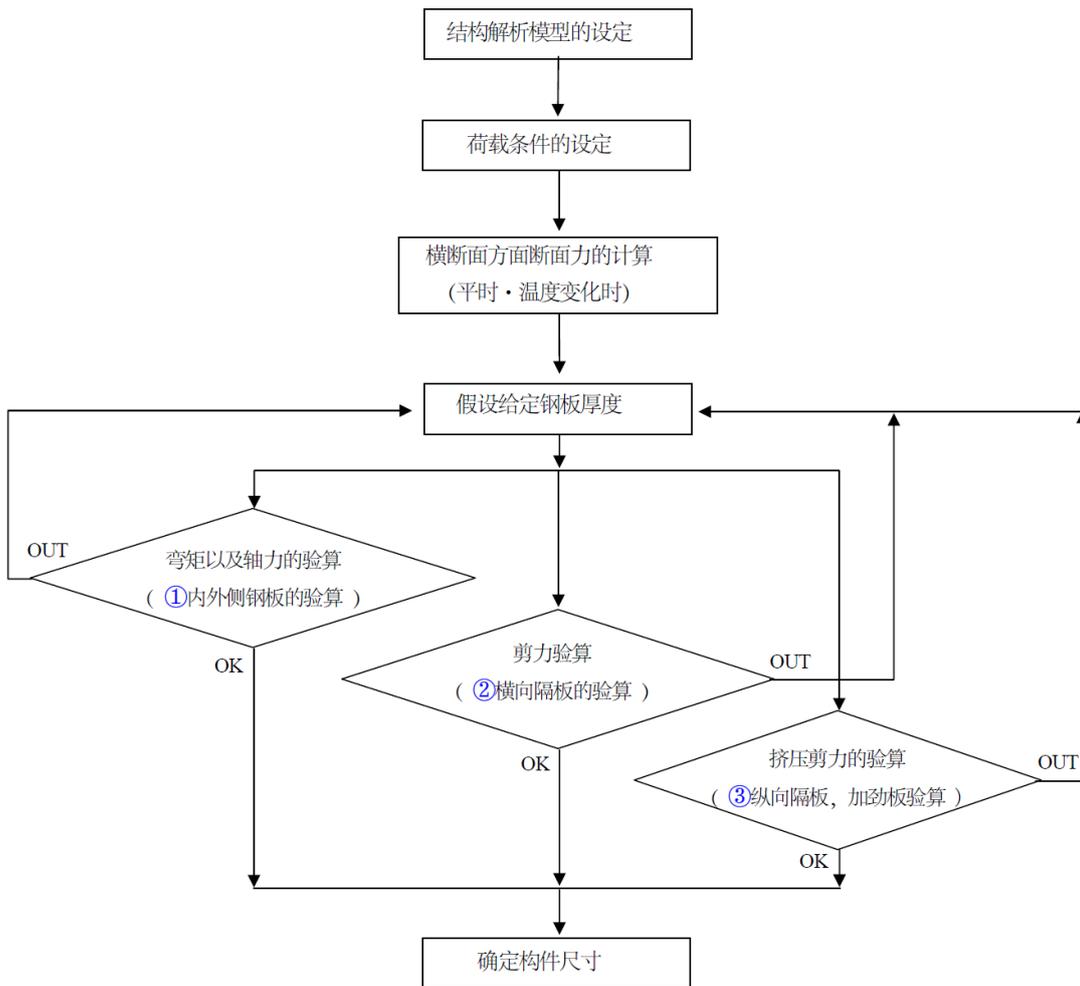


图5 横断面设计的流程图

8.4.4 结构设计应验算构件关键截面处的抗轴力与弯矩承载力和抗竖向剪力承载力，关键界面为跨中、端部弯剪受力较大处。变截面构件尚应验算其控制截面的受力性能。

8.4.5 构件截面轴向承载力验算应符合公式(3)和公式(4)的要求。

- a) 钢壳混凝土管节结构的轴心受压承载力应按下列公式计算：

$$N_{cu} = A_s f_s + A_c f_c \dots\dots\dots (3)$$

式中：

N_{cu} ——钢壳组合构件轴向极限抗压承载力(N)；

- A_s ——钢壳组合构件横截面钢板面积 (mm²) ;
 A_c ——钢壳组合构件横截面混凝土面积 (mm²) ;
 f_s ——钢材强度设计值 (MPa) ;
 f_c ——混凝土抗压强度设计值 (MPa) 。

b) 钢壳混凝土管节结构的轴心受拉承载力应按下列公式计算:

$$N_{tu} = A_s f_s \dots\dots\dots (4)$$

式中:

N_{tu} ——钢壳组合构件轴向极限抗拉承载力(N)。

8.4.6 构件截面抗弯矩承载力验算应符合公式 (5) ~ (8) 的要求。

钢壳混凝土管节结构的抗弯矩承载力宜按图6所示的塑性方法进行计算, 极限抗弯承载力计算公式如下:

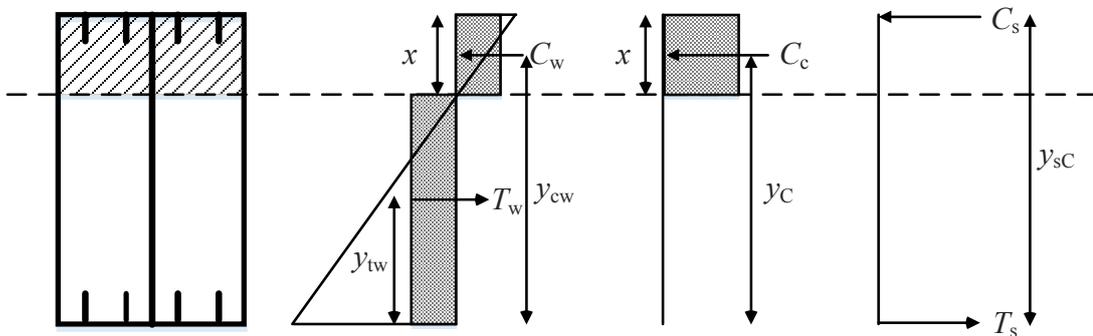


图6 组合构件截面抗弯承载力计算示意图

$$M_u = C_s y_{sc} + C_c y_c + C_w y_{cw} - T_w y_{tw} \dots\dots\dots (5)$$

$$C_s + C_c + C_w = T_s + T_w \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{cases} C_s = f_s A_{sC} \\ C_c = \beta f_c b_c x \\ C_w = f_s x t_w \\ T_w = f_s (h_s - t_c - t_T - x) t_w \\ T_s = 1.05 f_s A_{sT} \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{cases} y_{sc} = h_s - 0.5 t_T - 0.5 t_c \\ y_c = h_s - t_c - 0.5 t_T - 0.5 x \\ y_{cw} = y_c \\ y_{tw} = 0.5 (h_s - t_c - x) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- M_u ——钢壳组合构件极限抗弯承载力 (N·mm) ;
 C_s ——受压翼缘板压力 (N) , ;
 C_c ——混凝土压力 (N) , ;
 T_s ——受拉翼缘板拉力 (N) , ;
 C_w ——受压横隔板压力 (N) , ;
 T_w ——受拉横隔板拉力 (N) , ;
 y_{sc} ——受压翼缘板中心与受拉翼缘板中心的距离 (mm) , ;

- y_c ——混凝土受压中心与受拉翼缘板中心的距离 (mm) ; ;
 y_{cw} ——受压横隔板中心与受拉翼缘板中心的距离 (mm) ; ;
 y_{tw} ——受拉横隔板中心与受拉翼缘板中心的距离 (mm) ; ;
 x ——混凝土受压区高度 (mm) , 通过截面轴向力平衡方程 (5) 求出;
 f_s ——钢材的拉压设计强度 (MPa) ;
 A_{sC} ——受压翼缘板面积, 需考虑加劲肋面积一起算入 (mm²) ;
 A_{sT} ——受拉翼缘板面积, 需考虑加劲肋面积一起算入 (mm²) ;
 β ——混凝土强度图形系数, 按《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010) 采用;
 f_c ——混凝土的抗压设计强度 (MPa) ;
 b_c ——混凝土宽度 (mm) ;
 \square_s ——截面高度 (mm) ;
 t_w ——横隔板的厚度 (mm) , 在弯剪受力均较大截面, 按照8.4.3 的分离设计方法分别考虑截面受弯与受剪承载力, 此时受弯计算时不考虑横隔板贡献, 按 $t_w = 0$ 计算;
 t_c ——受压翼缘板厚度 (mm) ;
 t_T ——受拉翼缘板厚度 (mm) 。

8.4.7 构件截面抗竖向剪力承载力验算应符合公式 (9) ~公式 (13) 的要求。

钢壳混凝土管节结构应设置隔板, 当不设置纵横隔板时, 钢壳混凝土组合结构的抗剪承载力较差, 冲击荷载下可能产生结构的分离。由于纵隔板间距一般较大, 可能不穿过抗剪斜截面, 设计中不建议考虑纵隔板的抗剪贡献。设置横隔板的钢壳混凝土组合结构的抗剪承载力可按下式计算:

$$\begin{cases} V_u = V_{truss} + V_{web} \\ V_{truss} = V_{ut} \leq V_{uc} \\ V_{web} = \tau z t_w \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{cases} V_{ut} = \sin^2 \alpha_1 (\cot \theta + \cot \alpha_1) z t_w f_s \\ V_{uc} = f_{vud} b_c z \\ f_{vud} = k_m \max(1.25 f_c^{\frac{1}{2}}, 0.1879 f_c^{\frac{1}{2}} \beta_d \beta_\rho \beta_s) \leq 7.8 \text{ MPa} \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{cases} k_m = \frac{1}{\sqrt{s_t/h_s}} \leq 1 \\ \beta_d = \left(\frac{1000}{h_s}\right)^{\frac{1}{4}} \leq 1.5 \\ \beta_\rho = (100 \rho_w)^{\frac{1}{3}} \leq 1.5 \\ \beta_s = \frac{5}{(1 + \cot^2 \theta)} \\ \rho_w = A_{sT} / (s_t h_s) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

$$\begin{cases} f_t^2 + 3 f_t \tau \sin 2 \alpha_1 + 3 \tau^2 = f_s^2 \\ f_t = \frac{V_{uc}}{V_{ut}} f_s \leq f_s \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

当 θ 、 α_1 取建议值时:

$$\tau = -\frac{\sqrt{3} f_t}{4} + \frac{\sqrt{12 f_s^2 - \frac{21}{4} f_t^2}}{6} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

- V_u ——钢壳组合构件总受剪最大承载力 (N) ;
 V_{truss} ——钢壳组合构件抗剪桁架机制(如错误!未找到引用源。图7所示)受剪最大承载力(N);
 V_{web} ——钢壳组合构件钢腹板纯剪机制(错误!未找到引用源。图8所示)受剪最大承载力(N);

- V_{uc} ——钢壳组合构件抗剪桁架机制中混凝土斜压杆破坏最大承载力 (N) ;
 V_{ut} ——钢壳组合构件抗剪桁架机制中横隔板拉杆破坏最大承载力 (N) ;
 f_{vud} ——抗剪桁架模型中混凝土斜压杆的剪切设计强度 (MPa) ;
 b_c ——混凝土宽度 (mm) ;
 z ——混凝土受剪区高度, 取压应力合力的作用位置到受拉钢板的形心之间的距离 (mm) ;
 k_m ——考虑横隔板布置间隔对抗剪承载力的影响而设置的系数;
 f_c ——混凝土的抗压设计强度 (MPa) ;
 β_d ——考虑尺寸效应的系数;
 β_ρ ——考虑配筋率的系数;
 β_s ——考虑斜压角的系数;
 \square_s ——截面高度 (mm) ;
 ρ_w ——受拉面板钢材率;
 A_{sT} ——受拉钢板面积, 需考虑加劲肋面积一起算入 (mm^2) ;
 s_t ——横隔板间距 (mm) ;
 f_s ——钢材的拉压设计强度 (MPa) ;
 t_w ——横隔板的厚度 (mm) ;
 θ ——混凝土斜压杆斜压角, 建议取 30° ;
 α_1 ——横隔板斜拉角, 建议取 60° ;
 τ ——钢腹板纯剪应力 (MPa) ;
 f_t ——抗剪桁架机制在横隔板中产生的斜向拉应力 (MPa) 。

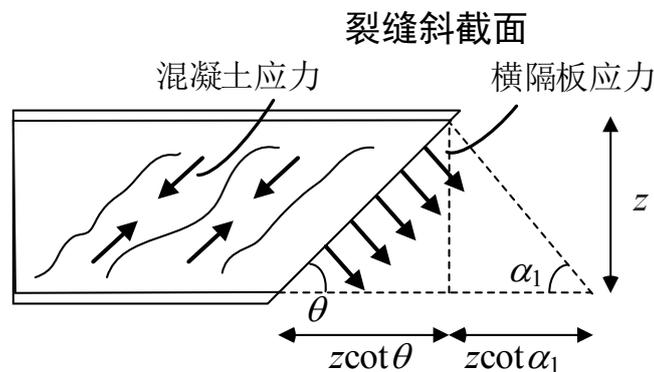


图7 组合构件抗剪桁架机制示意图

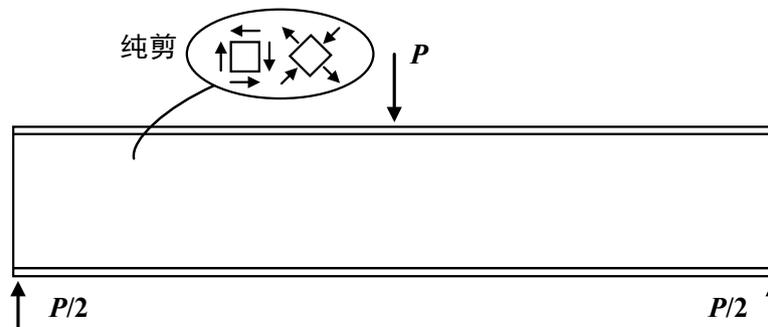


图8 组合构件腹板纯剪机制示意图

8.4.8 采用型钢连接件作为主要界面抗剪措施时，计算结合面上连接件配置数量可将结合面上的剪力按剪力包络图分段计算，求出每个区段上单位长度纵向剪力流 v_{1di} （或该区段的最大值）和区段长度 l_i ，连接件在该区段内均匀布置（如图9所示）；当按区段单位长度纵向剪力平均值进行设计时，单个连接件所受到的最大剪力应不大于其抗剪承载力的1.1倍，同时每个区段内纵向剪力之和应不大于所有连接件的抗剪承载力之和。每个区段内连接件的个数可由公式（14）确定：

$$n_i = \frac{v_{1di} l_i}{V_{su}} \dots \dots \dots (14)$$

式中：

V_{su} ——单个连接件的抗剪承载力。

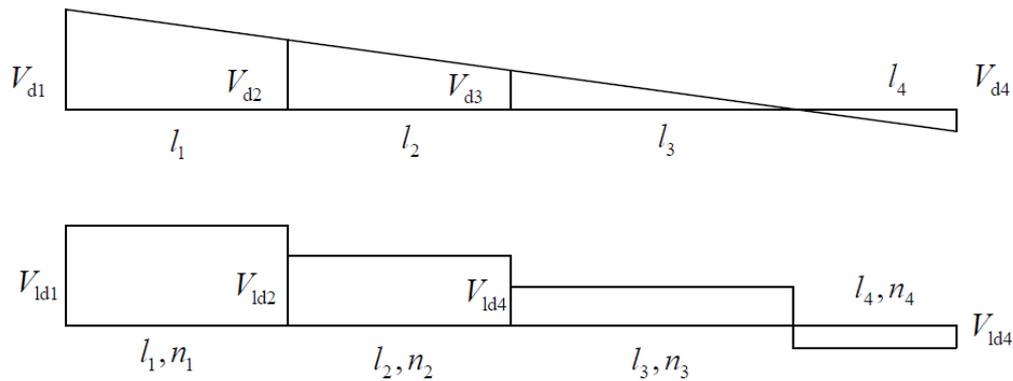


图9 剪力流分段示意图

8.4.9 型钢连接件抗剪承载力应按公式（15）~（16）计算：

$$V_{su} = 180 \lambda_t k_s k_{cp} k_h (t_{sc})^{0.425} (f_c)^{0.383} L_c \leq \frac{f_s t_{sc} L_c}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (15)$$

$$\begin{cases} k_s = \left(\frac{s_{sc}}{10 \times h_{sc}} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 1 \\ k_{cp} = 0.4 \left(\frac{t_{cp}}{t_{sc}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.43 \leq 1 \dots \dots \dots (16) \\ k_h = e^{-1.918 \frac{t_{sc}}{h_{sc}}} \end{cases}$$

式中：

V_{su} ——单个连接件的抗剪承载力（N）；

λ_t ——连接件形状系数，角钢取1.0，T型钢取1.15；

k_s ——连接件间距影响系数；

t_{sc} ——连接件腹板厚度（mm）；

L_c ——连接件长度（mm）；

s_{sc} ——连接件间距（mm）

h_{sc} ——连接件高度（mm）；

k_{cp} ——翼缘影响系数；

t_{cp} ——连接件相连翼缘厚度（mm）；

k_h ——连接件尺寸系数。

8.4.10 钢壳混凝土管节构件不宜验算混凝土裂缝宽度。

8.4.11 钢与混凝土结合面上的抗剪连接件在正常使用极限状态下的设计方法宜与其承载能力极限状

态设计相同，其中连接件抗剪承载力可按 75%折减。

8.4.12 钢混结合面抗剪连接件可按《组合结构设计规范》（GJ138）设计。正常使用极限状态在计算钢与混凝土结合面上的水平剪力流时，应考虑混凝土收缩、徐变的影响，可按《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG-D64）计算。

8.4.13 对管节运输、沉放等施工阶段验算时，混凝土浇筑顶板内钢板的变形不宜超过 10mm 或隔仓最大尺寸的 1/250。

8.5 抗震验算

8.5.1 钢壳混凝土沉管隧道的抗震设防类别应为 A 类。

8.5.2 钢壳混凝土沉管隧道应采用两水准抗震设防，抗震设防目标应符合下列规定：

- a) E1 地震作用(性能要求 1)：地震后隧道结构应力低于弹性极限，处于弹性状态；结构无破坏，结构物功能保持震前状态；
- b) E2 地震作用(性能要求 2)：地震后隧道结构应力超过弹性极限，但在屈服强度以内，结构处于弹性向弹塑性过渡状态；结构局部轻微损伤，不需维修或简单加固后可继续使用。

8.5.3 钢壳混凝土管节结构在进行强度验算时，结构强度应符合式（17）的规定。

$$S(F_r, \alpha_k) \leq R\left(\frac{f_k}{\gamma_f}, \alpha_k, C\right) \dots\dots\dots (17)$$

式中：

$S()$ ——与作用在结构之上的作用相关的作用效应函数；

$R()$ ——与结构材料强度及几何尺寸相关的结构抗力效应函数；

F_r ——作用在结构之上的作用组合，应包括永久作用标准值、可变作用的频遇值或准永久值以及地震作用标准值的最不利组合；

f_k ——材料的强度值，性能要求1时取强度标准值、性能要求2时取强度极限值；

α_k ——结构的几何参数标准值；

C ——结构的极限约束值；

γ_f ——材料性能的分项系数，按《公路隧道抗震设计规范》（JTG 2232）规定取用。

8.5.4 钢壳混凝土管节结构在地震作用组合下的变形验算应符合公式（18）的规定。

$$S_q \leq C \dots\dots\dots (18)$$

式中：

S_q ——地震作用组合的效应（如变形、位移等）设计值；

C ——设计对变形、位移等规定的相应限值。

8.5.5 钢壳混凝土管节结构的整体变形性能验算，应符合下列规定：

- a) 矩形横断面结构应验算层间位移角，且应符合公式（19）要求：

$$\Delta u \leq [\theta]h \dots\dots\dots (19)$$

式中：

Δu ——地震作用标准值产生的结构最大层间位移；计算时可不扣除结构整体弯曲变形，钢壳混凝土结构构件的截面刚度可采用弹性刚度；

$[\theta]$ ——层间位移角限值；对钢壳混凝土管节结构，当抗震性能要求为1时，层间位移角限值宜为1/550；当抗震性能要求为2时，层间位移角限值宜为1/250；

h ——计算结构层净高。

- b) 管节接头的防水材料应满足地震作用接头变形的防水性要求。

9 耐久性设计

9.1 一般规定

9.1.1 耐久性设计应收集并分析钢壳混凝土管节所处环境条件、结构形式、外形尺寸和使用状况等资料。当资料不全时，可按类似工程经验或进行现场勘查分析后确定。

9.1.2 沉管隧道环境类别宜按《水运工程结构耐久性设计标准》（JTS 153）的规定，合理划分海水与淡水环境。

9.1.3 结构构件应根据所处的局部环境条件，分区、分部位进行耐久性设计。当结构构件处于多种环境共同作用时，所采取的耐久性保障措施应满足每种环境单独作用下的耐久性设计要求，并考虑多种环境共同作用的相互影响。

9.1.4 处于海水环境的混凝土构件，宜采取防腐蚀措施。防腐蚀措施宜与管节外包防水体系进行综合考虑，可选用涂层钢筋和耐蚀钢筋、钢筋阻锈剂、混凝土表面处理（表面涂层、防腐面层）、电化学防护等。

9.1.5 钢壳混凝土管节的受力钢板防腐应根据施工条件选用牺牲阳极阴极保护和涂层防腐联合保障措施、或牺牲阳极阴极保护单独保障措施。当单独采用牺牲阳极阴极保护时，应考虑施工期的防腐蚀措施。

9.1.6 钢壳混凝土管节防腐蚀措施应根据具体部位、保护年限、施工、维护管理、安全要求和技术经济效益等因素确定。

9.1.7 当牺牲阳极埋设于海泥中时，应选用适当的阳极材料，并考虑其驱动电压额定电流效率的下降。

9.1.8 钢壳混凝土管节行车孔及管廊侧宜采用可重复涂装的油漆防腐，每次涂装防护年限不宜小于40年。

9.1.9 管节内因舾装件拆除、施工作业等而损坏的钢壳外露表面涂层应进行防腐补涂，补涂技术标准与主体结构一致。

9.2 表面预处理

9.2.1 钢壳混凝土管节在涂装之前必须进行表面预处理。

- a) 应将粗糙的焊缝打磨光滑，对焊接所产生的飞溅物应清除干净。
- b) 切割边的峰谷差超过1mm时，应打磨到1mm以下。
- c) 表面有层叠、裂缝或夹杂物时，应对其进行打磨处理，必要时应先补焊并再打磨。

9.2.2 钢材表面应无可见的油脂和污垢，并且没有氧化皮、铁锈、油漆涂层和异物。

9.3 涂层保护

9.3.1 防腐蚀涂料应满足设计要求，选用新产品时，应进行技术论证。

9.3.2 管节钢壳外壁防腐蚀涂料应能适应干湿交替变化，并具有耐磨性、耐冲击性能。防腐蚀涂料应与阴极保护配套，具有较好的耐阴极剥离性和耐海水浸泡性。

9.3.3 管节钢壳外壁采用涂层与阴极保护组合体系时，防腐蚀涂料设计使用年限应不小于40年，钢壳外壁涂层在钢壳加工阶段实施，其防腐涂层体系可按表5选用。

表5 管节钢壳外壁防腐涂层体系

配套涂料名称	单道膜厚(μm)	道数	涂层膜厚(μm)	施工方式	部位
环氧玻璃鳞片涂料	350	2	700	高压无气喷涂	牺牲阳极保护区
环氧玻璃鳞片涂料	500	3	1000	高压无气喷涂	沉管底部、远离牺牲阳极保护区

9.3.4 管节钢壳外壁防腐涂层性能应符合表 6 的规定。

表6 管节钢壳外壁防腐涂层指标与试验方法

序号	项目	性能指标	试验方法
1	附着力, MPa	≥8	GB/T 5210
2	抗冲击, cm	≥50	GB/T 20624.1
3	耐磨性 (1000g/1000r), mg	≤40	GB/T 1768
4	耐盐雾, 4000h	无起泡、生锈、脱落	GB/T 1771
5	抗氯离子渗透性 (30d), mg/cm ² ·d	≤1.0*10 ⁻³	JTJ 275-2000 附录 C
6	耐阴极剥离性 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离≤8	ISO 20340 (GB/T34145-2015, IDT ISO 20340)
7	耐海水浸泡性 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离≤8	
8	老化试验 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离≤8	

9.4 阴极保护

9.4.1 管节钢壳外壁宜采用牺牲阳极的阴极保护方式。

9.4.2 管节钢壳结构宜采用牺牲阳极保护。采用外加电流保护时, 严禁出现过保护现象。

9.4.3 阴极保护设计应收集下列资料:

- a) 管节钢壳的材质、外形尺寸、表面状况, 与相邻结构物的关系;
- b) 介质的盐度或化学成分;
- c) 介质的温度、含氧量、电阻率和 pH 值;
- d) 波浪、潮位、海底水流速和水中泥沙含量等;
- e) 介质的污染情况等。

9.4.4 阴极保护测量用参比电极应具有极化小、稳定性好、不易损坏、使用寿命长和适用海底介质等特性。参比电极的主要技术性能可按《船用参比电极技术条件》(GB 7387) 和表 7 执行。现场测量时, 应校准海水氯化银电极, 其相对于饱和甘汞电极的电位差宜为 0~10 毫伏之间。

表7 常用参比电极技术性能

名称	电极结构	电位 (V)	适用环境
饱和甘汞电极	Hg/Hg ₂ Cl ₂ 和KCl	+0.242	淡水、海水
饱和硫酸铜电极	Cu/饱和CuSO ₄	+0.316	海水、淡水、土壤
海水氯化银电极	Ag/AgCl海水	+0.250	海水
锌合金电极	Zn合金	-0.784	海水、淡水、土壤

9.4.5 阴极保护电位应符合表 8 的规定。钢壳阴极保护电位测量细则可见附录 A。

表8 钢结构的保护电位

环境、材质	保护电位	
	最正电位 Vs. Ag/AgCl/海水* (3)	最负电位 Vs. Ag/AgCl/海水* (3)
海水	-0.80	-1.12* (1-2)
淡水	-0.90	-1.15* (1-2)

*注1: 关于阴极保护最负电位, ISO 13174-2012、ISO 12473-2017、DNV RP B401 等国际标准均规定为-1.10V, 这是涵盖了外加电流和镁合金牺牲阳极等可能产生极负电位情况下的指标。但是在 DNV RP B401 中 5.4.2 特别说明“术语‘过保护(over-protection)’只适用于保护电位比-1.15(V)更负的情况, 这种电位不适用于铝基或锌基牺牲阳极阴极保护系统”。结合实际工程, 建议-1.15V 作为阴极保护电位上限。

*注2: 在港池、深坞、浅坞等地点测量钢壳极化电位, 只是作为阳极活化过程的验证。钢壳实际保护电位的测量要考虑海水介质中氯离子变化对氯化银参比电极标准电位的影响。

9.4.6 阴极保护的阴极保护电流密度可按表9选值, 采用防腐涂层的沉管钢壳保护电流密度应在表9中的选值基础上乘以涂层破损系数, 涂层破损系数应按《海港工程钢结构防腐技术规范》(JTS 153-3-2007)附录B确定。

表9 海港工程钢结构的保护电流密度

环境介质	钢结构表面状态	保护电流密度 (Ma/m ²)		
		初始值	维持值	末期值
静止海水	裸钢	100~130	55~70	70~90
流动海水	裸钢	510~180	60~80	80~100
海泥	裸钢	25	20	20
海水堆石	裸钢	60~90	40~50	50~75
海水中混凝土或水泥砂浆包覆	裸钢	10~25		
水位变动区混凝土	钢筋	5~20		

9.4.7 采用阴极保护的钢壳必须确保每一个设计单元或整体具有良好的通电连续性, 连接方式可采用直接焊接、焊接连接或电缆连接, 连接点面积大于连接用公斤或电缆的截面积, 连接电阻应不大于 0.01 Ω 。

9.4.8 钢壳总保护电流可按下列公式计算:

$$I = \sum I_n + I_f \dots\dots\dots (20)$$

$$\sum I_n = \sum i_n s_n \dots\dots\dots (21)$$

式中:

I ——总保护电流 (A);

I_n ——被保护钢结构各分部位的保护电流 (A);

I_f ——其他附加保护电流 (A)；

i_n ——被保护钢结构各分部位的初期保护电流密度 (A/m^2)；

s_n ——被保护钢结构各分部位的保护面积 (m^2)。

9.4.9 牺牲阳极材料采用铝合金牺牲阳极时，其电化学性能、金相组织和表面质量执行细则应符合附录 B 的要求。阳极的电化学性能应符合表 10 中的要求。测试条件为：电阻率为 70~80 欧姆-厘米；必要时阳极厂家应提供回填石埋覆下阳极长期电容量测试报告，测试过程应有第三方见证，以证明该阳极在回填介质埋覆下具有长期稳定的电化学性能。

表10 阳极电化学性能

检测类别	测试介质电阻率	工作电位 (V)	实际电容量(Ah/kg)	溶解状况
出厂试验项目	70~80欧姆-厘米	-1.05	海淡水中 ≥ 2500	腐蚀产物容易脱落， 表面溶解均匀
选择试验项目* (1)	70~80欧姆-厘米	-1.00	海底泥中 ≥ 1500	
型式试验项目* (2)	8~40毫米回填石/40欧姆-厘米海淡水	-0.95	≥ 1500	腐蚀产物容易脱落， 表面溶解均匀

*注：出厂试验项目电容量值是作为阳极出厂质量控制依据。而顶部覆水的海泥介质作为选择试验项目，是考虑上述海淡水介质中电化学性能合格的情况下，海泥介质中阳极电化学性能通常可以达标。同时，海泥中电容量值也是作为设计依据而不是质量控制指标。为了确认这一过程，在第三方出具检测报告证实海泥中阳极性能后，无需每批阳极出厂时测试。

9.4.10 牺牲阳极材料应根据沉管钢壳环境介质条件和经济因素综合确定。铝合金阳极的化学成分可按表 11 取值。

表11 铝合金阳极的化学成分（重量百分比）

Zn	In	Ti	Si	Fe	Cu	Sn	总杂质
4.0~ 6.0	0.015~ 0.030	最大0.03	0.05~0.4	最大0.07	最大0.003	最大0.02	最大0.05

9.4.11 牺牲阳极的几何尺寸和质量应能满足阳极初期发生电流、末期发生电流和使用年限的要求。

9.4.12 牺牲阳极的铁芯结构应能保证在整个使用期与阳极体的电连接，并能承受自重和使用环境所施加的荷载，其埋设方式和接触电阻应符合《铝-锌-镉系合金牺牲阳极》(GB 4948)的有关规定。

9.4.13 牺牲阳极的接水电阻、发生电流、牺牲阳极的数量和使用年限核算可按附录 C 计算。

9.4.14 牺牲阳极的布置应使被保护钢壳外壁的表面电位均匀分布，宜采用均匀布置，并采用计算机仿真模拟方法进行辅助设计，以便优化钢壳阴极保护方案。

9.4.15 牺牲阳极与被保护钢壳距离小于 100mm 时，应在牺牲阳极与被保护钢壳之间设置屏蔽层，其尺寸可按《船舶及海洋工程预计屏涂料通用技术条件》(GB7788)的有关规定执行。牺牲阳极紧贴钢壳表面安装时，除了按规定装配屏蔽层外，还应对贴近钢壳表面的牺牲阳极底面进行绝缘涂装。

9.4.16 牺牲阳极与被保护的钢壳之间的连接电阻应不大于 0.001Ω ，具体检验方式可按附录 D 执行。

9.4.17 阴极保护监测装置应具有测量、显示钢壳保护电位和牺牲阳极输出电流等基本功能。有条件时，应采用具有远距离遥测和分析评估功能的监测设备。

9.4.18 监测装置应设有手动检测接线端子和备用参比电极的接线端子。

9.4.19 参比电极电缆应选用耐海水腐蚀和耐老化的屏蔽电缆，其屏蔽层必须接地。

10 舾装件设计

10.1 一般规定

10.1.1 管节舾装件布设位置和数量应满足管节系泊、浮运、沉放、对接等施工工艺的要求。

10.1.2 舾装件的布设位置应与钢壳加工工艺、混凝土浇筑工艺统筹考虑。

10.1.3 端封墙、压载水箱、测量塔、人孔、吊点、系缆柱、拉合装置等舾装件，应根据各自受力特点和使用要求进行结构强度、变形及稳定性分析。

10.1.4 可重复利用的各类舾装件宜通过设置支座连接件的形式与管节相连接；支座连接件宜与钢壳面板焊接，防腐蚀措施宜与管节钢壳相同。

10.2 计算及构造要求

10.2.1 端封墙的计算与构造应符合下列规定：

- a) 端封墙应根据施工期最不利工况条件下的梁板结构进行计算，并应采用最高水位进行校核。
- b) 端封墙宜采用易拆卸结构，相邻管节端封墙间净距应满足水密门开启要求。
- c) 根据施工工艺要求，端封墙应预留排气管、进排水管、电缆孔、水密门等设施，并满足防水要求。

10.2.2 压载水箱的计算与构造应符合下列规定：

- a) 压载水箱宜按轴线对称分仓设置，宜采用轻便可拆装的结构。
- b) 压载水箱有效容积应根据水体重度、管节混凝土重度、钢壳重量、管节纵坡、预制误差等因素计算确定，并应满足施工期间管节抗浮安全系数要求。

10.2.3 测量塔和人孔的计算与构造应符合下列规定：

- a) 测量塔与人孔宜按空间体系进行结构整体分析，按浮运、沉放期最不利工况分别进行计算；测量塔塔顶水平变形不宜大于 15mm。
- b) 每管节宜设 2 处测量塔、1~2 处人孔，人孔宜与测量塔结合设置。

10.2.4 吊点的计算与构造应符合下列规定：

- a) 最大吊力应按管节沉放过程中最不利工况下 3 个吊点进行计算。
- b) 吊点耳板应与管节钢壳纵、横隔板位置对应，并与纵、横隔板坡口焊连接。

10.2.5 系缆柱可按水工模型试验确定的系缆力进行设计。

10.2.6 拉合装置拉合力应根据选定 GINA 止水带压缩曲线，按 GINA 止水带鼻尖压缩量达到初步止水时对应的压缩力进行计算。

附录 A

(资料性)

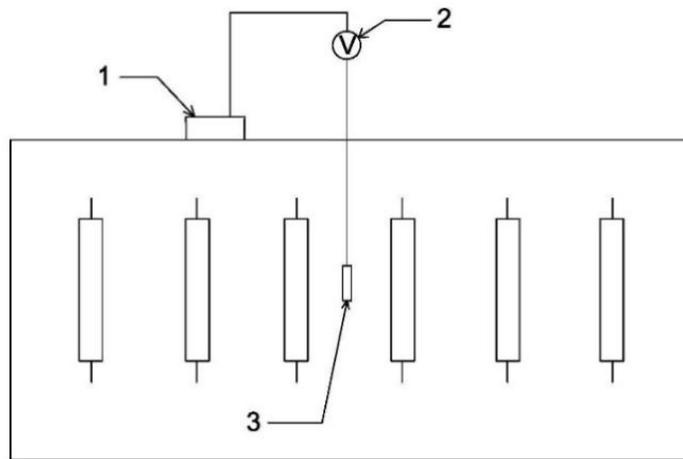
牺牲阳极安装后钢壳阴极保护电位检测

A.1 测量准备

牺牲阳极安装后的阴极保护电位试验需在深水坞中实施。每管节牺牲阳极安装完成后，在深水坞或港池中进行测量。测量前，钢壳及牺牲阳极需至少浸于水中3~5天，以保证阴极极化。

A.2 测量电路

阴极保护电位检测线路示意图如图A.1所示。



标引序号说明：

1-与钢壳有电连接的结构；

2-数字电压表，阻抗大于 $10M\Omega$ ；

3-银/氯化银参比电极；可用携带式银/氯化银参比电极；

图A.1 阴极保护电位检测线路图

A.3 检测要求

A.3.1 检测方法分两步-首先在顶面牺牲阳极不工作的状态下进行电位测试；若是测试结果不满足设计要求，则沉管安装施工单位需提供管顶测阳极浸没水中的工况进行再次测试。具体检测要求见下：

A.3.2 检测前确保牺牲阳极累计浸没水中时间超过3天；

A.3.3 阴极保护电位试验在沉管两侧和顶板各选取三个位置，选取位置需按阳极布置的疏密程度进行划分；

A.3.4 初定所检电位在 $-0.8V\sim-1.15V$ （相对于银/氯化银参比电极）。

A.4 测量步骤

A.4.1 从与钢壳有电连接的结构物引出电缆，连接至数字电压表；

A. 4. 2 银/氯化银参比电极通过电缆连接至数字电压表，选定测量点，将银/氯化银参比电极依次置于测量点处，参比电极在距离钢壳1米范围内进行测量，参比电极宜尽量靠近钢壳，不应与钢壳直接接触，也不应与牺牲阳极接触。

A. 4. 3 数字电压表调至直流电压档，读取不同测量点处的阴极保护电位；

A. 5 检测时机

在水坞/港池进行测量，应保证检测条件可控，进行保护电位检测时，测量区域应浸于水中，保证牺牲阳极、钢壳、水形成回路，牺牲阳极发挥保护作用。测量用时约1天。

附录 B

(资料性)

阳极检验项目、频次和技术要求

阳极检验项目的内容、频次和技术要求应符合表B.1表B.2的要求。

表B.1 阳极检验内容及频次

序号	检验项目	检验阶段	检验技术要求	船厂	三检
				检验频次	检验频次
1	重量	安装前	NACE SP0387 第 3.3 节	阳极数量的 10%	抽检船厂检验数量的 5%
2	尺寸		NACE SP0387 第 3.4 节	阳极数量的 10%	抽检船厂检验数量的 5%
3	表面质量		NACE SP0387 第 3.9 \ 3.10 节、DSG-2019-58 号联系单	阳极数量的 100%	抽检船厂检验数量的 5%
4	化学成分		相关设计要求	每批随机抽 3 个样	每批随机抽 3 个
5	电化学性能		参考 DNV RP B401 附录 B	每批随机抽 3 个样	每批随机抽 3 个
6	接触电阻 (牺牲阳极本体与铁脚之间)		试验方法按照 GB/T 4948-2002 的要求。	每批随机抽 10 个	每批随机抽 1 个
7	内部缺陷检验 (剖切)		NACE SP0387 第 3.11 节	每批随机抽 1 个 (见证)	1 个 (见证)
8	接触电阻 (安装后)	安装后	$\leq 0.01\Omega$	30 个—管顶及两侧面各 10 个 (见证)	30 个—管顶及两侧面各 10 个 (执行)
9	保护电位	安装后	在船坞/港池, 钢壳及牺牲阳极需浸于水中	1 组	1 组 (见证)

注 1: 批次说明: 每个管节所使用的牺牲阳极 (铝阳极) 作为一个批次;

注 2: 对以上检验项目有质量异议的, 船厂、监理及业主将有权加大复验抽样检查比例。

表B.2 检验技术要求

检验项目	检验依据	检验技术要求	
重量	NACE SP0387 第 3.3 节	每只阳极净重，毛重； 单只阳极的重量偏差为±3%；总重量偏差为 0~2%；	
尺寸	NACE SP0387 第 3.4 节	1. 上长：2290mm，下长：2310mm，上宽：230mm；下宽：270mm；厚度：250mm； 2. 允许偏差：长度±25mm；宽度±5%；厚度±10%；直线度 2%；	
表面质量	NACE SP0387 第 3.9 \3.10 节、 DSG-2019-58 号 联系单	1. 缩孔和冷隔 缩孔（含凹坑）：缩孔的深度不超过阳极高度的 10%； 冷隔：冷隔深度不超过 10mm；（阳极冷缩和表面重叠深度不能超过 10mm） 2. 非金属夹渣：不超过阳极表面的 1%。 3. 没有对人员安全有危害的突出物。 4. 裂纹 阳极表面不存在以下类型的裂纹： 纵向裂纹； 宽度大于 5mm 的横向裂纹； 宽度小于 5mm 的横向裂纹，最多不超过 10 条； 细小的裂纹团可以看做 1 条裂纹； 宽度小于 0.5mm 的裂纹，不计数；	
化学成分	相关设计要求	（重量比：%） 锌：4.0~6.0；镉：0.015~0.030；钛：≤0.03； 硅：0.05~0.4；铁：≤0.07；铜：≤0.003； 锡：≤0.02；其他总杂质≤0.05；铝：余量。	
电化学性能	参考 DNV RP B401 附录 B	在电阻率为 $70\Omega \cdot cm \sim 80\Omega \cdot cm$ 海淡水中，实际电容量： $\geq 2500A \cdot h/Kg$ ；工作电位负于 -1.05V（相对 S.C.E.）	
接触电阻检验	试验方法按照 GB/T 4948-2002 的要求。	$\leq 0.001\Omega$	
内部缺陷检验 （剖切检验）	NACE SP0387 第 3.3 节	1/2 截面	气孔不超过总剖切表面的 2%，每个面的 5%；非金属夹杂不超过总表面的 1%，每个面的 2%；与铁芯连接处空隙不超过总铁芯周长的 10%，每个面上周长的 20%。
	NACE SP0387 第 3.3 节	1/3 截面	气孔不超过总剖切表面的 2%，每个面的 5%；非金属夹杂不超过总表面的 1%，每个面的 2%；与铁芯连接处空隙不超过总铁芯周长的 10%，每个面上周长的 20%。
	NACE SP0387 第 3.3 节	1/4 截面	气孔不超过总剖切表面的 2%，每个面的 5%； 非金属夹杂不超过总表面的 1%，每个面的 2%； 与铁芯连接处空隙不超过总铁芯周长的 10%，每个面上周长的 20%。

附录 C

(资料性)

牺牲阳极的数量和使用年限核算

C.1 初始阶段

阳极块电阻 $R_a(\text{initial}) = \rho/2S(\text{initial})$, [ohm]

阳极块平均换算长度 $S(\text{initial}) = (L(\text{initial}) + B(\text{initial}))/2$, [m]

ρ : 电阻率, [ohm·m]

$L(\text{initial})$: 阳极块长度, [m]

$B(\text{initial})$: 阳极块宽度, [m]

C.2 最终阶段

阳极块长度 $L(\text{final}) = L(\text{initial}) - 0.10 \times u \times L(\text{initial})$, m

U: 阳极利用系数0.7~0.95, 平均值取0.82

最终阳极块质量 $m(\text{final}) = m(\text{initial}) \times (1-u)$, kg

$m(\text{initial})$: 初始阳极块净质量, [kg]

C.3 阳极块等效半径 (最终)

阳极块体积 $V_c(\text{final}) = (d_c/2)^2 \times 3.14 \times L(\text{final})$, m³

阳极块体积 $V_a(\text{final}) = m(\text{final}) / g$, m³

阳极块等效半径 $r(\text{final})$

$= \{(V_a(\text{final}) + V_c(\text{final})) / L(\text{final}) \times 2 / 3.14\}^{0.5}$, m

d_c : 阳极块高度, [m]

$L(\text{final})$: 阳极块长度, [m]

$m(\text{final})$: 最终阳极块质量, [kg]

g : 铝合金比重 2.7×10^3 [kg/m³]

C.4 阳极块电阻 (最终)

阳极块电阻 $R_a(\text{final}) = \rho/2S(\text{final})$, ohm

$S(\text{final}) = (L(\text{final}) + 2r(\text{final}))/2$, m

ρ : 电阻率, [ohm·m]

$L(\text{final})$: 阳极块长度(final), [m]

$r(\text{final})$: 阳极块等效半径, [m]

C.5 阳极块的安装数量

阳极块总重量 (最小)

$Ma_{\text{Min}} = I_c(\text{Mean}) \times T \times T_y / (u \times e)$, kg

$I_c(\text{Mean})$: 运营时防腐蚀电流的所需值, [A]

T : 设计寿命, [年]

T_y : 年换算时间 8,760[h/y]

u : 电流效率 0.82 [-]

e : 海泥中有效电容量 1500[A·hour/kg]

C.6 发生电流的计算值和阳极使用年限核算

初始阳极块发生电流

$I_{ai} = (E_{0c} - E_{0a}) / R_{a(\text{initial})}$, A/pc.

初始阳极块发生总电流

$I_{at} = I_{ai} \times n_{ac}$, A

$I_{at} > \text{or} = I_c$, 即:

初始阳极块发生电流, A $>$ 初期阴极保护电流需求值, A

因此, 满足初始极化条件

E_{0c} : 防腐蚀电位 -0.8 [V] (标准海水氯化银电极)

E_{0a} : 闭合电路电位 -1.00 [V] (标准海水氯化银电极)

R_a : 阳极块接地电阻, [ohm]

I_a : 阳极块发生电流 [A/pc.]

n_{ac} : 阳极块设置数= M_{aMin} / M_{aunit} , 块

末期阳极块发生总电流 $I_{af} = (E_{0c} - E_{0a}) / R_{a(\text{final})}$ A/pc.

$I_{at} = I_{af} \times n_{ac}$, A

$I_{at} > \text{or} = I_c$

末期阳极块发生电流, A $>$ 末期阴极保护电流需求值, A。

附录 D

(资料性)

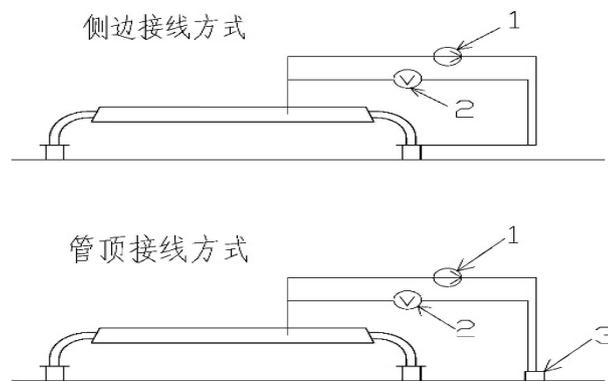
牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座接触电阻

D.1 测量方法

通一恒定的直流电，测定牺牲阳极铁脚—牺牲阳极支座的电压降，计算牺牲阳极铁脚与阳极支座之间的接触电阻。

D.2 测量电路：

测定牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻电路如图D.1。



标引序号说明：

- 1-直流恒流电源，可显示电压、电流；
- 2-数字电压表，阻抗大于 $10M\Omega$ ；
- 3-钢壳顶面排气孔等与支座有电连接的钢结构物；

图D.1 牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻测量线路图

D.3 检测时机

单块牺牲阳极安装到位后即可测量。

D.4 检测数量

每个管节管顶及两个侧面各测量10处，共30处。

D.5 测量步骤

- D.5.1 将直流恒流电源稳定于某一固定电流A（如， $4A\sim 10A$ ）；
- D.5.2 数字电压表调至毫伏档，读取牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座之间的电压降U；

D.6 数据处理

牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻R按公式（D.1）计算。依据技术协议，牺牲阳极安装后的接触电阻不大于 0.01Ω 。

$$R = \frac{U}{A} \dots\dots\dots (D. 1)$$

式中：

R ——牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻；

U ——牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座之间的电压降 U ；

A ——直流恒流电源显示电流读数；

D.7 注意事项

各测点接触应良好，需去掉表面涂层，避免测点的接触电阻影响测量结果。

附录 E

(资料性)

钢壳混凝土管节检验要求

E.1 自密实混凝土浇筑工艺及质量要求

E.1.1 在浇筑混凝土之前，应对管节钢壳进行验收。

E.1.2 混凝土施工所用原材料规格及质量应符合相关规定，温度控制要求较高情况下，混凝土胶凝材料用量、品种等宜通过水化热、绝热温升以及遮阳等降温措施试验确定。

E.1.3 自密实混凝土宜采用强制式搅拌机集中拌和，搅拌时间应符合设计要求，应将各种组合材料搅拌均匀。

E.1.4 混凝土浇筑应连续，浇筑速率、调控措施、自由下落高度及浇筑温度等应满足相关规范的要求。

E.1.5 混凝土浇筑过程中，当浇筑面距离上层钢板约0.5m时，应采用变速浇筑法，降低混凝土浇筑速度，提高混凝土浇筑质量。

E.2 硬化混凝土检验：

E.2.1 钢壳管节自密实混凝土的强度应满足设计要求，硬化混凝土的力学性能按《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081)检测。

E.2.2 钢壳管节自密实混凝土硬化混凝土内部密实性及填充情况宜采用非破损的方法进行检验。

E.3 混凝土验收：

E.3.1 混凝土收缩性能宜按国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)执行。

E.3.2 钢壳管节自密实混凝土验收应由具备资质的技术人员承担，测试过程中应将仪器和试模放置在平整、稳固的地面上。验收不合格的，应予以退回。

E.3.3 钢壳管节自密实混凝土工程质量验收应按《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204)的规定执行。

E.4 钢壳管节自密实混凝土顶面脱空检验：

E.4.1 钢壳管节内自密实混凝土脱空检测部位以顶面脱空检测为主，钢壳管节自密实混凝土顶面允许脱空宜按设计要求执行，应包括脱空高度、脱空面积比等主要技术指标。

E.4.2 脱空检测宜采用冲击映像法和中子法等适宜方法，冲击映像法要求对底板顶和顶板顶进行100%检测，采用冲击映像法检测出“分格存在脱空大于5mm的单点或单个分格中脱空大于3mm的面积大于30%”采用中子法进行复测。

E.4.3 用冲击映像法检测前，应开展试验，验证其对钢壳混凝土脱空检测的有效性。

附录 F

(资料性)

冲击映像仪选用要求及检测流程

F.1 仪器选用类别

可选用下列两类冲击映像仪对钢壳自密实混凝土结构顶面脱空程度进行检测：

- a) 单点式：单点冲击、单点接收映像信号；
- b) 扫描式：冲击器与接收传感器一体化设计，滚动扫描冲击、连续接收映像信号。

F.2 仪器选用要求

F.2.1 应具有制造厂的产品合格证，检测前需经过检定或校准，有效期宜为1年。

F.2.2 冲击器应根据检测构件的厚度配备产生不同冲击频率的钢球型冲击器或电磁激振的圆柱形冲击器。

F.2.3 应选择垂直冲击测试面的冲击方式，且冲击力度应基本保持一致，偏差小于 $\pm 5\%$ 。

F.2.4 接收传感器应针对钢壳混凝土接触面具体情况，选择合适频响范围的传感器。

F.2.5 检测装置应根据检测对象与目的，调整震源偏移距，以保证有足够的分辨率和检测精度。

F.2.6 采集软件应能实时显示环境噪音和每次冲击时传感器的输出信号，分析软件应可实时读取和显示相应的输出信号，包括相对应的时间和测试信号曲线，且具有时间域窗口选择、数字滤波、时域分析、频率幅值谱（FFT）分析功能，宜具有三维图形等分析功能。

F.2.7 冲击映像仪不宜在有机械振动和高振幅电（磁）噪音干扰环境下使用，测试前确保不能有震源影响信号采集。

F.2.8 冲击映像仪有下列情况之一时，应按规范进行校准后方可使用：

- a) 新仪器启用前；
- b) 超过校准有效期；
- c) 更换模块和传感器；
- d) 仪器维修后；
- e) 对测试值有怀疑时。

F.3 仪器保养：

冲击映像仪使用后，应对冲击装置的冲击器和接收传感器及时清洁，妥善保管。冲击映像仪应定期保养，当仪器长时间不用时，应将电池取出或给电池定期充电。

F.4 检测流程

F.4.1 冲击映像法检测应符合下列流程：

- a) 使用冲击映像法进行检测的人员，应经培训合格后方准上岗。
- b) 测前应进行调查、收集检测项目的相关资料，制定检测方案，对仪器设备进行状态核查。

F.4.2 调查、收集的资料宜包括下列内容：

- a) 工程概况信息，主要包括工程名称及设计、施工、监理、建设和委托单位名称等；
- b) 被检测结构或构件的名称、设计图纸、设计变更、施工记录、施工验收等资料；

- c) 钢和混凝土相关资料，主要包括原材料品种和规格、混凝土浇筑和养护情况、设计强度等级、物性参数等资料；
 - d) 构件、结构所属环境条件、使用期间的加固情况；
 - e) 明确委托方检测目的和具体要求；
 - f) 结构或构件外观质量及存在的问题。
- F. 4.3 检测方案宜包括下列主要内容：**
- a) 工程概况、结构或构件设计及施工情况；
 - b) 检测依据、目的及委托方要求；
 - c) 委托方与受托方单位名称、负责人姓名、职务及其联系方式；
 - d) 检测人员与分工，
 - e) 仪器设备，以及具体测试方法、步骤、数量、位置及进度；
 - f) 测区划分、测线布置；
 - g) 安全、文明及环保措施；
 - h) 所需相关方配合的工作。
- F. 4.4 检测部位表面应清洁、平整，无沙粒、浮土和积水等。必要时应清扫、磨平。**
- F. 4.5 当检测中出现可疑区域或测点时，应对其进行复测或加密检测，必要时采用其他方法进行验证。**
- F. 4.6 应根据检测对象调试数据采集系统，正确设置采集系统参数。**
- F. 4.7 采用单点式冲击映像检测系统检测时，应符合下列规定：**
- a) 测点按测试面均匀布置，布满整个测试面。测点疏密应考虑预估脱空的位置、大小等因素。
 - b) 构件的测点和测区应标明编号和位置。
 - c) 传感器与混凝土面间宜采取耦合措施。
 - d) 接收传感器应置于测点上，传感器和冲击器应位于钢壳自密实混凝土结构顶板的同侧。
- F. 4.8 采用扫描式冲击映像检测系统检测时，应符合下列规定：**
- a) 按测试面划分测线，测线的位置和测线网格的疏密应考虑预估脱空的位置、大小等因素。
 - b) 扫描器应紧贴钢壳自密实混凝土结构顶板表面，宜匀速滚动，移动速率不宜大于 0.1m/s。
 - c) 检测时，应及时观察时域曲线和振幅谱图的波形变动情况，并保存有效波段和振幅谱。必要时应进行复测。
- F. 4.9 应及时分析测点的时程波形，对比典型时程图。当出现下列情况时，可判断脱空：**
- a) 冲击弹性波的动力时程响应时间明显长于无脱空区域的。
 - b) 根据冲击响应强度、振幅谱图等综合分析。

附录 G

(资料性)

中子法检测仪选用要求及检测流程

G.1 仪器选用

G.1.1 中子法脱空检测仪检测前应经过室内标定试验进行检定或校准，脱空分辨率不低于2.5mm。

G.1.2 使用单位必须持有广东省环保厅颁发的“辐射安全许可证”。

G.1.3 含中子源检测设备的转移、存放、监管和使用应满足国家法律、法规对放射性物质的相关管理规定。

G.1.4 中子法脱空检测仪主要由中子源、热中子探测元器件，核电子线路及讯号数据采集等部分组成，可探测厚度60mm以内钢板下的混凝土脱空，测试前必须检测钢板厚度和混凝土背景含水量。

G.1.5 中子法脱空检测仪有下列情况之一时，应按规定进行校准和测试后方可使用：

- a) 新仪器启用前或仪器维修后；
- b) 超过质检有效期；
- c) 重复测量时，在聚乙烯标准块测量时，热中子计数率的变化率超过 2%。

G.2 检测流程

G.2.1 检测流程使用中子法进行现场检测的工作人员应经辐射安全培训持证上岗。

G.2.2 检测前应获取被检测构件的设计图纸、设计变更、施工记录等资料，特别是钢和混凝土的品种和规格以及内部筋肋分布情况。

G.2.3 应根据被检测构件的具体情况制定相应的检测实施方案，包括测线测点的布置、检测时机的安排、检测人员及设备、检测工作需要提供的配合。

G.2.4 检测应在平整的钢壳面上进行，检测前应对钢壳表面进行清理，清除表面的铁锈、焊渣和浮浆等杂物，并宜保持钢壳表面干燥。

G.2.5 测线测点应按仪器有效检测面积在检测面上均匀布置，并按顺序标号，结构设计图上加筋肋的测点要有区分标识。

G.2.6 现场检测时，应在检测场所周围设置明显辐射标识，严禁不相关人员进入。

G.2.7 在工作人员进行仪器安装操作时严禁进食和吸烟，并且必须穿戴工作服和手套进行操作。

G.2.8 对检测中出现的可疑测点，应进行复测或加密检测，必要时采用其他方法进行验证。

G.2.9 在操作人员完成有关仪器操作后，应按规定做好相关仪器安全存放工作。

G.2.10 应根据分析结果标识脱空部位及深度，绘制脱空分布平面图，计算不同脱空深度面积比。