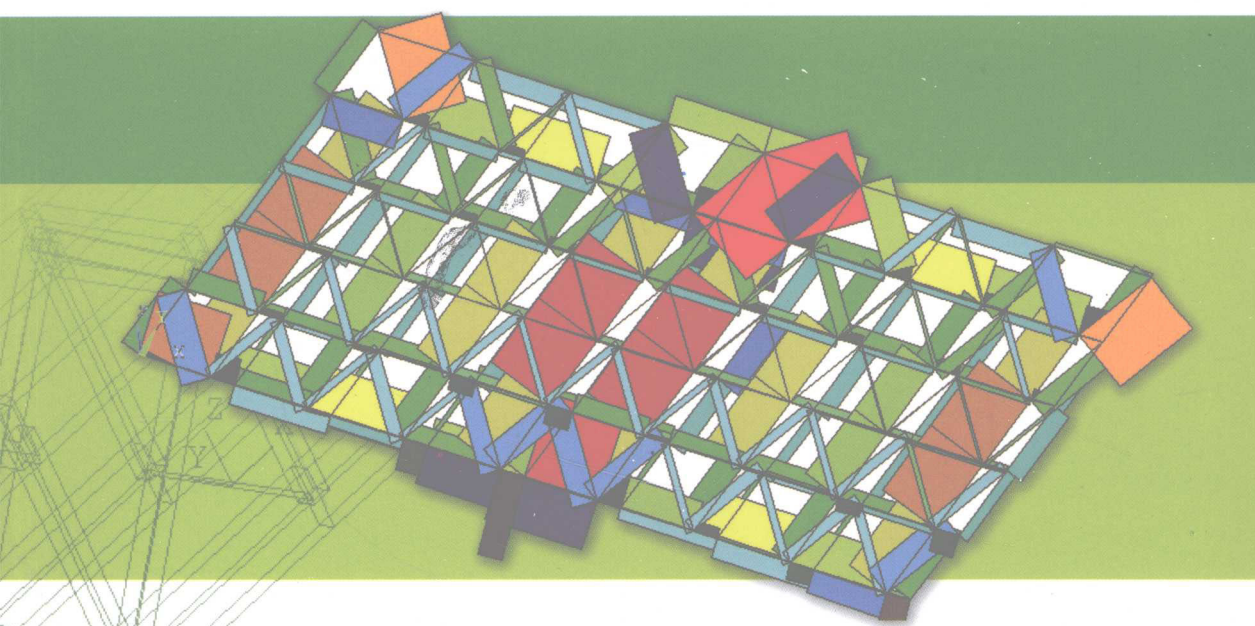


TUMU GONGCHENG JIEGOU
GAOJI FANGZHEN YU SHEJI FANGFA

土木工程结构 高级仿真与设计方法

计静 刘文洋 徐松芝 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土木工程结构 高级仿真与设计方法

计静 刘文洋 徐松芝 著

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书基于 ANSYS 有限元软件对典型的工程结构开展了仿真分析, 向读者系统全面地展示了 ANSYS 结构分析方法与结果, 提出实际工程的设计建议, 对从事科研和工程方面的读者有很大的借鉴。本书共 22 章。主要内容涉及传统的钢结构、钢筋混凝土结构、大跨空间结构、组合结构、特种结构和海洋结构。

本书可作为土木、力学等相关专业研究生或高年级的大学本科学生学习结构数值分析的参考书, 并且对工程技术人员开展结构仿真具有一定的参考价值。

图书在版编目 (C I P) 数据

土木工程结构高级仿真与设计方法 / 计静, 刘文洋,
徐松芝著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 8
ISBN 978-7-5170-0224-6

I. ①土… II. ①计… ②刘… ③徐… III. ①土木工
程—工程结构—仿真设计 IV. ①TU318

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第230594号

书 名	土木工程结构高级仿真与设计方法
作 者	计静 刘文洋 徐松芝 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限公司
规 格	175mm×245mm 16 开本 16 印张 313 千字
版 次	2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	32.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

随着计算机技术的飞速发展和在工程领域的广泛应用，数值计算在工程模拟技术中得到了迅速发展，有限元方法在计算力学和计算工程科学领域成为最有效的计算方法。通过有限元方法可进行实际工程的模拟仿真，尤其对大型的，在实验室中无法实现的结构体系开展有限元模拟，摆脱实验室对结构尺寸和实验条件的约束，对实际工程的建设提供有利的技术支撑。

21 世纪伊始，作为通用的有限元分析软件，ANSYS 以其强大的功能受到越来越多的结构分析及其他相关专业科研与工程计算人员的偏爱，已经成为有限元理论和实际工程结构计算问题之间的桥梁。本文采用 ANSYS 通过具体的、典型的工程分析，向读者系统全面地展示了 ANSYS 结构分析方法与结果处理，提出实际工程的设计建议。对从事科研和工程方面的读者有很好的借鉴。

本书共包括 22 章。第 1~5 章为传统的钢结构分析，包括不规则钢框架、大跨度变截面门式刚架、超悬臂桁架结构和钢制厚球壳应力分析；第 6 章和第 7 章为大开洞钢筋混凝土板和拱形钢筋混凝土薄壳板的分析；第 8 章为超静定钢杆体系的优化分析；第 9 章为移动载荷作用下桥的动力分析；第 10~12 章为大跨空间结构分析，包括典型的 6 点支承网架、扇形单点支撑网架和施威德勒型球面网壳结构分析；第 13 章和第 14 章为组合结构分析，包括钢板内夹混凝土标志塔和内置型钢—钢管混凝土新型组合柱分析；第 15 章为储罐的动力与静力分析，包括 2 部分：第 1 部分为储罐静力分析与设计建议、储罐的模态分析和罕遇地震下的弹塑性时程分析；第 2 部分为 LNG 储罐静力屈曲和模态分析；第 16 章为压力容器双重非线性稳定分析；第 17 章为带栅板的管道分析，包括带栅板的管道散热性能数值仿真和间接有限元法冷却栅管热应力仿真；第 18 章为带过渡区的变直径 GFRP 导管流体仿真；第 19 章为

单层球面网壳结构风振响应分析；第20章为海洋环境下变直径独立桩分析；第21章为预应力H型钢混凝土组合梁动力性能参数分析；第22章为套建增层框架及其恢复力模型。

参加本书编写的有东北石油大学计静副教授、徐松芝讲师和黑龙江八一农垦大学的刘文洋讲师。其中第1~第6章、第8~第9章、第20~第22章由计静副教授执笔，共计字数为15.9万字；第7章、第10~第14章和第19章由刘文洋执笔，共计字数为7.7万字；第15~第18章由徐松芝执笔，共计字数为7.7万字。全书由计静副教授统稿。

东北石油大学张文福教授和刘迎春讲师对本书的编写提出了宝贵建议，在此表示致谢。东北石油大学结构教研室杨涛、常亮、谢丹、杨丹、刘洋、董清会、邢菲和杜娟等研究生为本书的顺利出版给予很大帮助，在此表示感谢。对国家自然科学基金面上项目（编号：51178087）、教育部科学技术研究重点项目（编号：212045）、黑龙江省教育厅科学技术研究项目（编号：12511022）、东北石油大学大学生创新项目和黑龙江八一农垦大学科研启动基金项目（编号：校启S2006—2）的资助与支持表示致谢。

由于时间仓促和编写人员水平的局限，书中不当和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

2012年7月

目 录

前言

第 1 章 不规则钢框架结构分析	1
1.1 研究目的	1
1.2 建筑布置	1
1.3 结构仿真分析	2
1.4 构造措施	7
1.5 小结	7
1.6 数据与命令流	7
第 2 章 大跨度变截面门式刚架分析	17
2.1 国内外研究	17
2.2 有限元模型	17
2.3 荷载计算及荷载组合	18
2.4 静力内力与位移	19
2.5 变截面门式刚架的合理结构形式	23
2.6 设计方法	26
第 3 章 悬臂结构体系	27
3.1 研究目的	27
3.2 悬臂结构设计	27
3.3 两种方案对比	29
3.4 小结	30
3.5 数据与命令流	30
第 4 章 钢制厚球壳应力计算	33
4.1 轴对称问题	33
4.2 有限元模型	34
4.3 球壳应力有限元解	35
4.4 球壳应力解析解	37

4.5	方法验证	37
第5章	钢结构框架分析	38
5.1	单层钢框架分析	38
5.2	多层钢结构框架分析	41
第6章	钢筋混凝土大开洞板分析	54
6.1	研究目的	54
6.2	选取方案	54
6.3	结构分析	55
6.4	有限元仿真	56
6.5	构造措施	57
6.6	造价分析	58
第7章	混凝土圆柱壳屋面结构分析	59
7.1	研究目的	59
7.2	方案对比	59
7.3	有限元模型	60
7.4	有限元解	60
7.5	支撑框架设计	61
7.6	设计方法	62
第8章	超静定钢杆体系分析	63
8.1	超静定钢杆体系非线性分析	63
8.2	可变参数的桁架体系优化仿真	65
第9章	移动车辆载荷作用下桥梁的动态响应	72
9.1	常量力作用下桥梁的动态响应	72
9.2	移动简谐载荷作用下桥梁的动态响应	80
9.3	跨度为72m的桁架桥分析	83
第10章	六点支承网架分析	85
10.1	研究目的	85
10.2	计算方法对比	85
10.3	网架结构有限元分析	86
10.4	节点设计	91
10.5	构造设计	92
10.6	命令流	93

第 11 章 扇形单点支撑网架分析	95
11.1 研究目的	95
11.2 扇形网架结构	95
11.3 节点设计	97
11.4 构造设计	98
11.5 小结	98
11.6 命令流	98
第 12 章 施威德勒型球面网壳结构分析	101
12.1 研究目的	101
12.2 网壳结构有限元模型	101
12.3 特征值屈曲分析	102
12.4 非线性稳定分析	103
12.5 小结	104
第 13 章 标志塔结构分析	105
13.1 研究目的	105
13.2 有限元模型	105
13.3 标志塔自振特性	106
13.4 标志塔地震时程分析	106
13.5 小结	108
第 14 章 型钢—钢管混凝土组合柱轴压性能	109
14.1 国内外研究	109
14.2 有限元模型	110
14.3 有限元结果	111
14.4 试件对比	113
14.5 力学性能	113
14.6 命令流	113
第 15 章 储罐静力与动力分析	115
15.1 不同充液下储罐罐壁静力分析与对比	115
15.2 敞口锚固式储罐壳液耦合有限元分析	119
15.3 考虑液固耦合的储罐弹塑性地震响应分析	124
15.4 大型 LNG 储罐静力风致屈曲仿真	133
15.5 液化天然气储罐外壳结构模态分析	137

第 16 章	压力容器双重非线性稳定分析	141
16.1	问题的提出	141
16.2	压力容器的有限元模型	141
16.3	特征值屈曲分析	142
16.4	非线性稳定分析	143
16.5	临界荷载的对比分析	146
16.6	抗失稳措施	147
16.7	小结	147
16.8	命令流	148
第 17 章	带栅板的管道分析	150
17.1	带栅板的管道散热性能数值仿真	150
17.2	间接有限元法冷却栅管热应力仿真	152
第 18 章	带过渡区的变直径 GFRP 导管流体仿真	163
18.1	计算参数	163
18.2	有限元模型	164
18.3	有限元结果分析	165
18.4	小结	167
第 19 章	单层球面网壳结构风振响应分析	168
19.1	风荷载	168
19.2	具有空间相关性风场的计算机模拟	171
19.3	单层球面网壳结构风振响应分析	175
19.4	抗风设计建议	188
第 20 章	海洋环境下变直径独立桩分析	190
20.1	研究目的	190
20.2	单桩水平承载力的计算方法	190
20.3	独立桩的有限元建模	191
20.4	波浪理论	192
20.5	实例应用	200
20.6	小结	202
第 21 章	预应力 H 型钢混凝土组合梁动力性能参数分析	203
21.1	引言	203
21.2	预应力 H 型钢混凝土梁单调荷载一位移曲线的仿真分析	204

21.3	构件截面弯矩—曲率关系参数分析	207
21.4	构件单调荷载—位移曲线参数分析	210
21.5	恢复力模型	211
21.6	小结	216
第 22 章	套建增层框架及其恢复力模型	217
22.1	引言	217
22.2	套建增层体系选取	217
22.3	IDARC 中 Park 三线性恢复力模型简介	220
22.4	基于 IDARC 的角钢混凝土柱建议用恢复力模型	222
22.5	基于 IDARC 的内置 H 型钢预应力混凝土组合框架梁建议用恢 复力模型	224
22.6	在 IDARC 中套建框架节点区域的处理	227
22.7	小结	227
参考文献		228

Contents

Foreword

Chapter 1 Irregular Steel Frame Analysis	1
1.1 Study Objective	1
1.2 Construction Layout	1
1.3 Structural Simulation	2
1.4 Construction Measures	7
1.5 Summary	7
1.6 Data and Command	7
Chapter 2 Large – span Portal Frame Analysis	17
2.1 Domestic and Foreign Research	17
2.2 Finite Element Model	17
2.3 Load Calculation and Load Combination	18
2.4 Internal Force and Displacement	19
2.5 Reasonable Structural Form	23
2.6 Design Method	26
Chapter 3 Cantilever Structure	27
3.1 Study Objective	27
3.2 Cantilever Structure Design	27
3.3 Two Kinds of Scheme Comparison	29
3.4 Summary and Improvement	30
3.5 Data and Command	30
Chapter 4 Steel Thick Spherical Shell Stress Calculation	33
4.1 Axial Symmetry Problem	33
4.2 Finite Element Model	34
4.3 Finite Element Solution on Spherical Shell Stress	35
4.4 Analytic Solution of Spherical Stress	37

4.5	Method Validation	37
Chapter 5	Steel Frame Analysis	38
5.1	Single – floor Steel Frame Analysis	38
5.2	Multi – floor Steel Frame Analysis	41
Chapter 6	Reinforced Concrete Perforated Plate Analysis	54
6.1	Study Objective	54
6.2	Scheme Selection	54
6.3	Structure Analysis	55
6.4	Finite Element Simulation	56
6.5	Construction Measures	57
6.6	Cost Analysis	58
Chapter 7	Reinforced Concrete Cylindrical Shell Roof Structure Analysis	59
7.1	Study Objective	59
7.2	Scheme Comparison	59
7.3	Finite Element Model	60
7.4	Finite Element Solution	60
7.5	Supporting Frame Design	61
7.6	Design Method	62
Chapter 8	Statically Indeterminate Steel System Analysis	63
8.1	Nonlinear Analysis of Statically Indeterminate Steel System	63
8.2	Optimization and Simulati of the Truss System	65
Chapter 9	Dynamic Response of Bridge under Moving Vehicle Load	72
9.1	Dynamic Response of Bridge under Constant Force	72
9.2	Dynamic Response of Bridge under Moving Harmonic Load	80
9.3	Truss Bridge Analysis with 72m Span	83
Chapter 10	Six Point Support Grid Analysis	85
10.1	Study Objective	85
10.2	Calculation Method Comparison	85
10.3	Finite ElementAnalysis on Grid Structure	86
10.4	Node Design	91
10.5	Construction Measures	92
10.6	Command	93

Chapter 11	Fan – shape Single – point Supporting Grid Analysis	95
11.1	Study Objective	95
11.2	Fan – shape Grid Structure	95
11.3	Node Design	97
11.4	Construction Measures	98
11.5	Summary	98
11.6	Command Stream	98
Chapter 12	Schwedler Reticulated Shell Structure Analysis	101
12.1	Study Objective	101
12.2	Finite Element Mode	101
12.3	Eigenvalue Buckling Analysis	102
12.4	Nonlinear Stability Analysis	103
12.5	Summary	104
Chapter 13	Tower Structure Analysis	105
13.1	Study Objective	105
13.2	Finite Element Model	105
13.3	Natural Vibration Characteristics of Tower	106
13.4	Seismic Time – history Analysis of Tower	106
13.5	Summary	108
Chapter 14	Axial Compression Performance of Steel – Steel Tubar Filled with Concrete Column	109
14.1	Domestic and Foreign Research	109
14.2	Finite Element Model	110
14.3	Finite Element Results	111
14.4	Specimen Contrast	113
14.5	Mechanical Properties	113
14.6	Command Stream	113
Chapter 15	Static and Dynamic Analysis of Storage Tank	115
15.1	Static Analysis and Comparison of Tank Wall with Different Filling Liquild	115
15.2	Shell Fluid Coupled Finite Element Analysis of Anchored Storage Tank	119
15.3	Considering Fluid Solid Coupled Tank Elastoplastic Seismic	

Response Analysis	124
15.4 Static Wind – induced Buckling Simulation of Large LNG Tank	133
15.5 LNG Storage Tank Shell Structure Modal Analysis	137
Chapter 16 Double Nonlinear Stability Analysis for Pressure Vessel	141
16.1 Problem Put Forward	141
16.2 Finite Element Model of Pressure Vessel	141
16.3 Eigenvalue Buckling Analysis	142
16.4 Nonlinear Stability Analysis	143
16.5 Comparative Analysis of Critical Load	146
16.6 Anti – failure Measures	147
16.7 Summary	147
16.8 Command Stream	148
Chapter 17 Pipeline Analysis with Grid Plate	150
17.1 Numerical Simulation on Heat Dissipating Performance of Grid Plate Pipe	150
17.2 Thermal Stress Simulation Adopting Indirect Finite Element Method on Grid Plate Pile	152
Chapter 18 Fluid Simulation on Variable Diameter GFRP Catheter with Transition Zone	163
18.1 Calculation Parameters	163
18.2 Finite Element Model	164
18.3 Finite Element Results Analysis	165
18.4 Summary	167
Chapter 19 The Wind Vibration Response of Single – layer Spherical Reticulated Shell	168
19.1 The Wind load	168
19.2 Wind Field Simulation with the Spatial Correlation	171
19.3 Wind Induced Vibration Response of Single – layer Spherical Reticulated Shell Structure	175
19.4 Wind Design Proposals	188
Chapter 20 Analysis on Independent Variable Diameter Pile under Marine Enviroment	190
20.1 Study Obiective	190
20.2 Calculation Method on Horizontal Bearing Capacity of Single Pile	190
20.3 Finite Element Modeling of Single Pile	191
20.4 Wave Theory	192

20.5	Case Application	200
20.6	Summary	202
Chapter 21 Parameter Analysis on Dynamic Performance of Prestressed		
	H-steel Reinforced Concrete Beams	203
21.1	Introduction	203
21.2	Simulation Analysis on Load—displacement Curves of PSRCB	204
21.3	Parameter Analysis on Sectional $M-\varphi$ Relationship for Simulative Members	207
21.4	Parametric Analysis on $P-\Delta$ Curves of Simulative Members	210
21.5	Hysteretic Models	211
21.6	Conclusions	216
Chapter 22 Outer-jacketing Structure for Story-adding and Its Restoring		
	Force Model	217
22.1	Introduction	217
22.2	Selection of Outer—jacketing Structure	217
22.3	Park Three Linear Restoring Force Model in IDARC	220
22.4	Restoring Force Model of Angle Steel Concrete Column Based on IDARC	222
22.5	Restoring Force Model of H-type Steel Concrete Composite Beam Based on IDARC	224
22.6	Processing of Frame Node Region In IDARC	227
22.7	Conclusions	227
	References	228

第 1 章 不规则钢框架结构分析

1.1 研究目的

黑龙江省牡丹江市的镜泊湖及其沿湖周边进行了维修改造，现已成为远近闻名的旅游胜地，为增添远道而来游客们的娱乐环节，该湖岸边还修建了长为 34.2m，带休息平台的多功能坡形滑道。在夏季作为流水滑道，在冬季作为短程滑雪坡道，供游客们享受北方冬天所特有的运动娱乐项目。为充分利用空间，滑道下部的空间用压型钢板组合楼板和轻质墙围护起来，作为娱乐场所管理办公室和售票机构，建成的滑道实体如图 1-1 所示。到目前为止，其应用状况良好。本章开展的研究可使读者对多功能不规则框架分析有所掌握。



图 1-1 滑道实体图

1.2 建筑布置

按照要求，同时为便利滑道上下水循环，滑道需延伸到湖面中一定的距离，因此，应采用便于水中施工的结构体系。结合湖边地质条件勘察报告可知，土质较差结构沉降量较大，应采用结构较轻的体系，考虑到上述两点因素，滑道的支撑体系采用了轻钢框架结构。钢框架结构的立体图如图 1-2 所示。

钢框架结构采用对称布置，每榀框架之间用横梁相连，根据设置的滑道宽度，每榀框架梁的计算长度为 8.4m。图 1-2 中自左向右框架柱轴线为①轴到⑩轴，位于⑥轴到⑩轴上的 5 榀框架之间未设置钢柱，为不等高单跨结构。考虑到办公室楼盖需承担自重和活荷载，位于①轴到⑤轴上的 5 榀框架设置了中柱，为二跨多层框架。整体结构跨度和高度都有变化，属于不规则框架。纵向柱间距取为 3.6m，底层层高为 3.6m，其他层高为 3.3m，建筑总高度为 10.2m，⑥轴到⑩轴之间的 5 榀框架柱底部在水面以下 3.0m 处，在⑩轴的柱间设置斜撑，有利于抵抗垂直滑道方向的风荷载及地震作用。在⑤轴和⑥轴之间为可供游人通过的湖边散步路，因此底层未设置相应房间。该建筑物抗震设计基本信息^[1,2]如表 1-1 所示。本文系统介绍

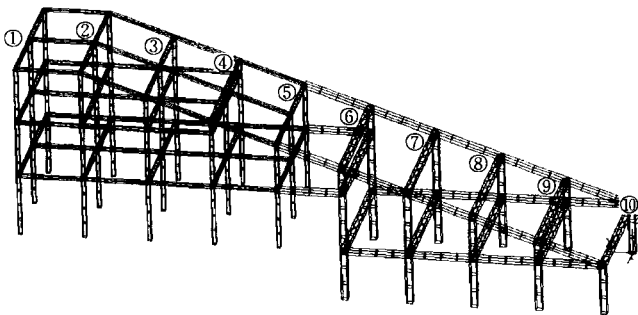


图 1-2 钢框架结构立体图

了该不规则钢结构框架的设计过程，包括材料、截面的选取，采用大型有限元仿真软件 ANSYS^[3]对 2 榀具有代表性的结构内力和变形进行了计算，并与相应规范进行了对比分析，重在为今后同类工程的设计提供参考。

表 1-1

抗震设计基本信息

设计使用年限	抗震设防烈度	抗震设防类别	抗震等级
50 年	6 度	重点设防类	3 级

1.3 结构仿真分析

1.3.1 材料和截面选取

钢材选用焊接性能较好的 Q345 - B 级，混凝土采用立方体抗压强度标准值为 30MPa 的常规混凝土，基础采用柱下外包式独立基础，基础埋深取为 2.1m。框架梁与框架柱均采用热轧无缝圆钢管^[4]，①轴到⑤轴之间的 5 榀框架柱截面尺寸为 $\phi 200 \times 6$ ，框架梁和坡道斜梁的截面尺寸为 $\phi 180 \times 5$ ，次梁的截面尺寸为 $\phi 120 \times 4$ ；⑥轴到⑩轴之间的 5 榀框架柱的截面尺寸为 $\phi 351 \times 16$ ，框架梁和坡道斜梁的截面尺寸为 $\phi 325 \times 16$ ；框架梁柱之间对接焊接，次梁与框架梁之间采用节点板螺栓连接。外部的围护结构采用内夹 100mm 厚保温材料的彩钢板^[4]，楼板采用压型钢板组合楼板，压型钢板在施工时可作为模板，省去了支模所花的材料费和人工费，压型钢板上设置了剪力键，上浇 100mm 厚的混凝土。柱脚焊接钢板，与预埋在混凝土基础中的钢板之间用 Q345 级锚栓连接，下端锚固在基础上。为防止钢管长期受到腐蚀，采用表面镀锌钢管，而长期位于水下的钢管要循环经历冻融作用，选用的钢材要有满足冲击韧性的力学性能，同时表面也必须采取特殊的处理。