



港口工程煤棚空间网壳结构设计

牟 伟

(山东省港口集团日照港集团有限公司, 山东 日照 276800)

摘要: 空间网壳结构为港口工程中大型煤棚常用的结构形式, 因其明显的空间特性, 常规设计手段无法满足计算分析要求。针对空间网壳结构的受力分析和设计问题, 结合日照港石臼港区西区“散改集”工艺及环保提升项目的煤棚工程, 采用通用结构有限元分析方法, 从分析原则、结构选型、结构建模、作用和作用组合、结果后处理等方面进行分析。结果表明, 采用正放四角锥双层圆柱面网壳、螺栓球网架节点、下弦支承的空间结构形式可满足工程使用要求, 成果可为类似工程提供参考。

关键词: 空间网壳结构; 有限元; 稳定性

中图分类号: U 653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0056-05

Structural design of space reticulated shell structure in coal shed of port engineering

MOU Wei

(Rizhao Port Group Co., Ltd. of Shandong Port Group, Rizhao 276800, China)

Abstract: Spatial reticulated shell structure is commonly used in large coal shed in port engineering. Due to its obvious spatial characteristics, conventional design methods cannot meet the requirements of calculation and analysis. In view of the analysis and design of spatial reticulated shell structure, combined with the coal shed project of the “transform bulk into container transportation” technology and environmental protection improvement project in the west area of Shijiu harbor district of Rizhao Port, the analysis principle, structure type selection, structural modeling, actions on structures and action combination, and post-processing of the results are analyzed by the general structural finite element analysis method. The results show that the spatial structure with the square pyramid double-layer cylindrical shell, the bolted spherical node and the lower chord support can meet the requirements of engineering. The results can provide references for the similar engineering.

Keywords: space reticulated shell structure; finite element; stability

随着我国经济的发展, 煤炭、矿粉等散货的贮运量不断增加, 由此带来的粉尘污染问题越来越引起行业重视。随着国家相关环保政策的相继发布, 煤场的扬尘问题已成为政府管理的重点。为适应国家和水运行业对港口绿色发展的要求, 促进行业绿色健康发展, 封闭煤棚的应用日益广泛。封闭煤棚能够有效减少煤尘排放量、控制扬尘问题、改善环境质量。由于煤棚平面尺寸较大, 且内部空间需要满足工艺作业要求, 因此空间网壳结构是经常采用的结构形式。目前有关煤棚空

间网壳结构的研究文献并不多见, 已有文献多集中于结构形式选取原则方面^[1-2], 缺乏对设计中具体的分析要求和要点的阐述。为系统总结分析空间网壳结构分析与设计问题, 本文结合日照港石臼港区西区“散改集”工艺及环保提升项目煤棚空间网壳结构, 对其设计原则和设计要点等进行了分析。

1 工程概况

日照港石臼港区西区“散改集”工艺及环保

收稿日期: 2022-01-15

作者简介: 牟伟(1972—), 男, 硕士, 从事港口工程建设、经营管理与生产组织。

提升项目位于日照港石臼港区西作业区中部、集装箱铁路卸车线东侧、港西十三路西侧、港西三十六路北侧、港西三十路南侧区域。新建焦炭装箱工艺煤棚，并配套卸车堆料、取料装箱系统及配套设施设备，年作业量为 220 万 t 焦炭(11 万 TEU)。煤棚建筑投影尺寸为 360 m×75 m(长×宽)，总建筑面积为 2.7 万 m²。主体结构采用落地空间网壳结构，网壳结构跨度 360 m、宽 71.5 m，网壳厚度为 2.55 m，采用 3D3S 软件进行设计，SAP2000 软件进行校核。

2 结构形式选取

根据《空间网格结构技术规程》^[3]，常用网壳结构可采用单层或双层形式，曲面可采用球面、圆柱面、双层抛物面、椭圆抛物面等曲面形式，其中双层网壳可由两向、三向交叉的桁架体系或由四角锥体系、三角锥体系等组成。根据工程尺寸特点和工艺使用要求，初步分析确定采用正放四角锥双层圆柱面网壳结构形式，采用螺栓球网架节点，从整体结构受力、空间使用要求角度出发，并结合地区使用经验，结构采用下弦支承形式。结构平面和剖面见图 1。

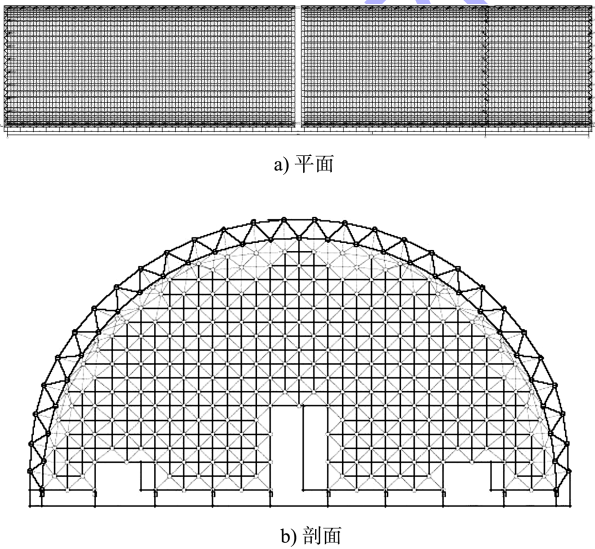


图 1 结构平面和剖面

3 结构分析原则

3.1 分析内容

空间网壳结构主要进行重力荷载、风荷载、

地震等作用下的位移和内力计算，空间结构的内力和位移一般按弹性理论计算。对于非地震状况，作用和作用效应组合按《建筑结构荷载规范》^[4]进行计算，杆件截面和节点设计按作用基本组合效应确定内力设计值；对于地震状况，地震组合的效应按《建筑抗震设计规范》^[5]计算。位移验算中，按作用的标准组合效应计算其挠度。

3.2 边界条件处理

空间网壳结构一般应根据结构形式、支座节点的位置、数量和构造情况以及支撑结构的刚度确定合理的边界约束条件。本文中支座节点的边界约束条件，按实际构造采用水平向可侧移、竖向固定的弹性支座。空间结构分析考虑上部空间结构与下部支撑结构的相互影响，一般有 3 种处理方式：1)把上部空间结构折算等效刚度和等效质量作为下部支撑结构分析时的条件；2)把下部支撑结构折算等效刚度和等效质量作为上部空间结构分析时的条件；3)将上、下部结构整体分析。其中第 1 种处理方式较为常用，本文也选取第 1 种方式考虑上下部结构的相互影响。

3.3 有限元分析基本方程

按有限元法进行空间结构静力计算时，基本方程为：

$$KU=F \tag{1}$$

式中： K 为空间结构总弹性刚度矩阵； U 为空间结构节点位移向量； F 为空间结构节点荷载向量。

网壳稳定性计算采用考虑几何非线性的有限元法，即荷载-位移全过程分析。除考虑满跨均布荷载外，还考虑了半跨活荷载分布的情况。

4 结构分析参数和指标限值

4.1 结构分析参数

根据《建筑结构可靠性设计统一标准》^[6]，本工程结构安全等级为二级，设计使用年限为 50 a，结构重要性系数采用 1.0。根据《建筑工程抗震设防分类标准》^[7]，本工程抗震设防类别为丙类。结构采用正放四角锥双层圆柱面网壳结构和螺栓球节点。网架构件采用《低合金高强度结构钢》^[8]中规定的

Q355B 圆钢管。螺栓球采用《优质碳素结构钢》^[9] 规定的 45 号钢。模型中采用的结构分析参数为：屈服强度 355 MPa，弹性模量 206 GPa，剪切模量 79 GPa，线膨胀系数 $1.2\times10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，泊松比 0.30。

4.2 指标限值

根据网壳结构计算内容，结构需要计算的设计指标主要有杆件应力比、长细比和挠度。根据《空间网格结构技术规程》《钢结构设计标准》^[10] 和工程实践经验，各项设计指标限值见表 1。

表 1 设计指标限值				
杆件类型	允许应力比	允许长细比		结构挠度
		受压	受拉	
一般杆件	0.90	180	250	短向跨度的 1/250
支座附近杆件	0.85	150	200	短向跨度的 1/250

5 网壳结构计算分析

5.1 结构有限元模型

空间网壳结构节点按铰接考虑，杆件只承受轴向力，各单元连接处满足变形协调条件。采用空间杆系有限元法进行计算分析，建立的空间网壳结构有限元模型见图 2，其中杆件总数为 22 312 个，节点总数为 5 716 个。

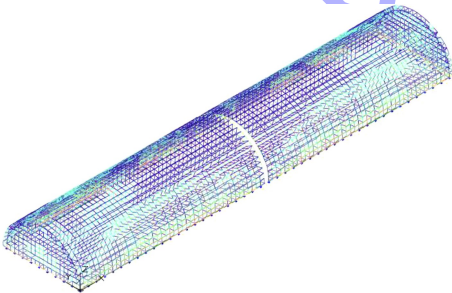


图 2 空间网壳结构有限元分析模型

5.2 作用和作用组合

5.2.1 恒荷载

作用于结构上的恒荷载主要包括结构自身重力；上弦恒荷载(屋面荷载) 0.25 kN/m^2 ；下弦恒荷载 0.05 kN/m^2 ；马道恒荷载 1.00 kN/m 。

5.2.2 活荷载

作用于结构上的活荷载主要包括上弦活荷载(不上人屋面) 0.50 kN/m^2 ；马道活荷载 1.00 kN/m 。

5.2.3 风荷载

根据《建筑结构荷载规范》，本工程所处地

面粗糙度类别为 A 类，50 a 重现期基本风压取 0.40 kN/m^2 。风荷载根据基本风压、风振系数、体形系数等进行计算后施加于结构。

5.2.4 温度作用

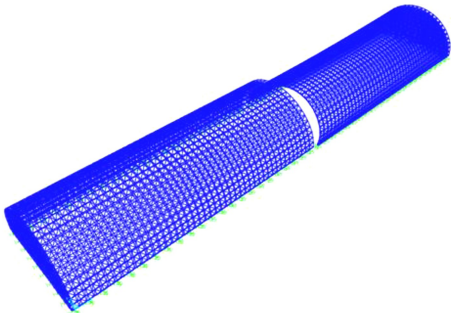
温度作用考虑最大温升工况和最大温降工况，温度作用标准值分别为 $40、-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。空间网壳结构因温度变化而产生的内力，将温差引起的杆件端部反力作为等效荷载反向作用于杆件两端节点上，然后通过有限元法进行分析。

5.2.5 地震作用

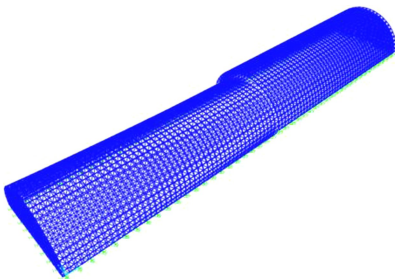
根据地质勘察资料，本工程场地类别为 II 类，抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度为 $0.10g$ ，设计地震分组为第三组，场地特征周期为 0.45 s 。地震作用采用振型分解反应谱法进行计算，将地震工况施加在空间网壳结构上。计算的结构前十阶自振周期见表 2。结构前 6 阶振型见图 3。

表 2 结构前十阶自振周期

振型	自振周期/s	振型	自振周期/s
第 1 振型	0.761	第 6 振型	0.270
第 2 振型	0.425	第 7 振型	0.247
第 3 振型	0.325	第 8 振型	0.204
第 4 振型	0.308	第 9 振型	0.203
第 5 振型	0.272	第 10 振型	0.193



a) 第1振型



b) 第2振型

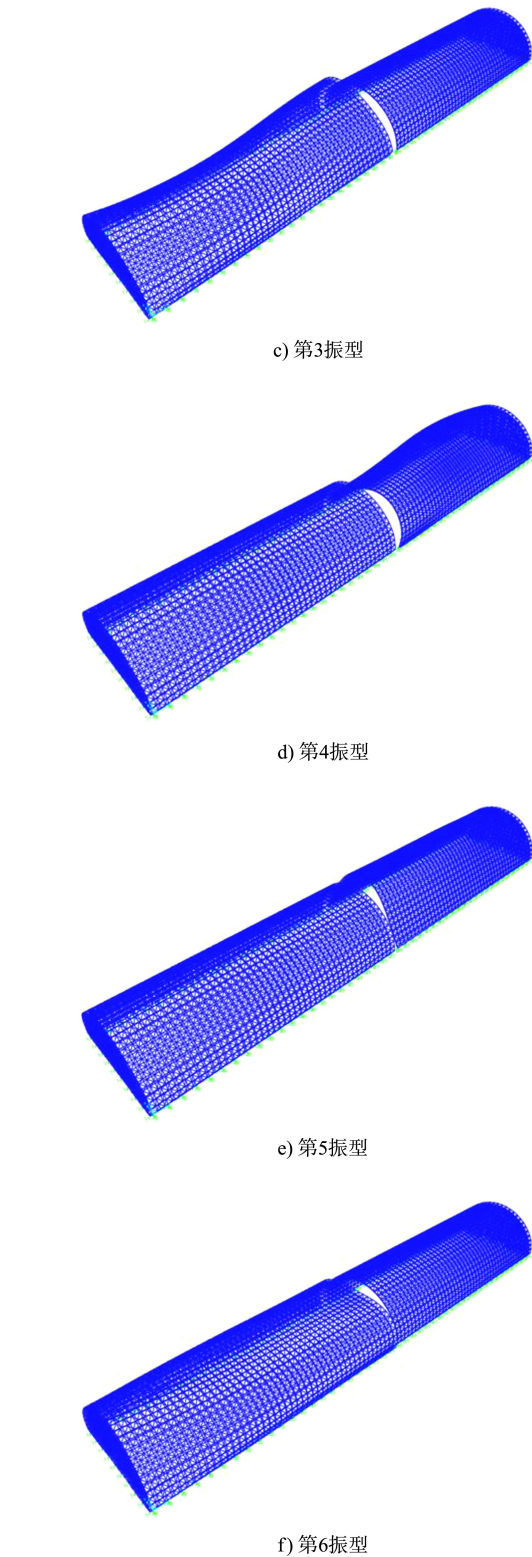


图 3 结构前 6 阶振型

5.2.6 作用组合

作用组合按《建筑结构荷载规范》《建筑结构可靠性设计统一标准》的规定确定。考虑作用的不同施加位置 and 不同作用的不利组合，本文分析中考

虑的作用组合共 168 种。

5.3 主要构件截面

通过结构分析，并通过不断优化调整模型，使其分析结果满足 4.2 节所述指标限值且满足经济性要求，最终确定结构的构件截面。网架杆件规格和数量见表 3，球节点规格和数量见表 4，结构构件所需高强螺栓见表 5。

表 3 网架杆件分析结果

圆管规格(直径×壁厚)/(mm×mm)	数量/个	总长度/m
75. 5×5. 0	7 222	27 970. 6
88. 5×6. 0	6 054	23 062. 5
114. 0×6. 0	4 866	18 748. 7
140. 4×6. 0	2 264	9 297. 9
159. 0×8. 0	1 418	5 779. 4
159. 0×10. 0	118	468. 0
180. 0×12. 0	242	956. 6
219. 0×12. 0	116	459. 1
219. 0×14. 0	8	31. 7
219. 0×16. 0	4	15. 9

表 4 球节点数量

规格	BS160	BS200	BS240	BS260	BS280	BS300
数量/个	4 047	1 267	360	24	10	8

表 5 所需高强螺栓数量

规格	M20	M27	M33	M36	M39	M45	M48	M52
数量/个	22 706	10 712	5 346	2 830	460	1 338	512	680

5.4 主要构件受力分析结果

5.4.1 计算挠度

在作用标准组合下，结构挠度见图 4，跨中最大挠度为 157 mm，小于规范限值的短向跨度的 1/250(=286 mm)，满足规范要求。

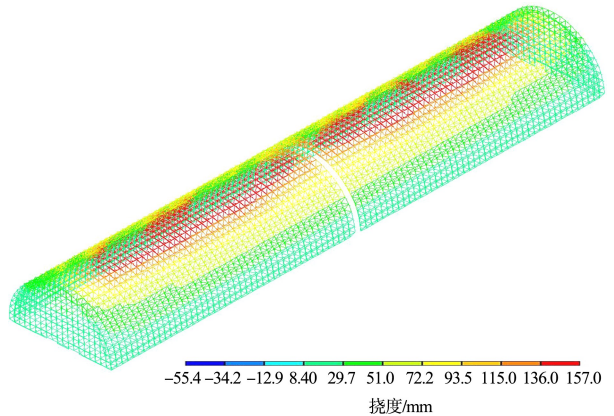


图 4 结构挠度

5.4.2 杆件长细比

杆件最大长细比与限值比值为 0.91 (<1.0), 符合规范要求。

5.4.3 杆件强度和稳定性验算

杆件轴力见图 5a), 杆件应力见图 5b), 强度和稳定性验算的杆件应力比最大为 0.85, 满足设计指标限值要求。全部杆件应力比分布见图 6。

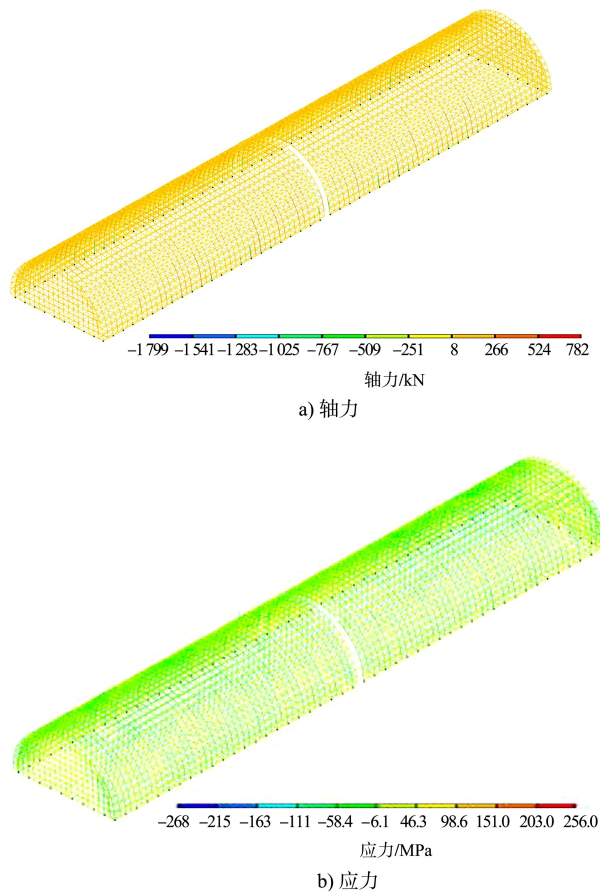


图 5 构件轴力与应力

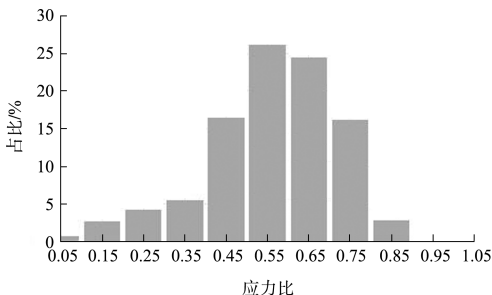


图 6 杆件应力比分布

6 结论

1) 网壳结构空间特征明显, 采用有限元法进行结构整体分析可较好地模拟其受力特性, 分析

流程为作用计算→作用组合→内力计算分析→构件截面设计→细部构造设计。其中作用组合时, 须根据使用要求对各种作用的类型和作用位置进行最不利组合。

2) 根据工程平面尺寸和工艺使用要求, 煤棚采用正放四角锥双层圆柱面网壳、螺栓球网架节点、下弦支承的空间结构形式。

3) 通过有限元计算分析优化, 结构最大挠度为 157 mm, 最大长细比为 137, 最大应力比为 0.85。各项设计指标均满足设计限值要求。

4) 日照港石臼港区西区散改集工艺及环保提升项目煤棚工程空间网壳结构于 2021 年建成, 目前使用情况良好, 可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 王浩, 黄裕茜. 对煤场封闭钢结构方案的比选与造价分析[J]. 中国工程咨询, 2018(12): 62-64.

[2] 乔支昆, 朱滢政, 李竞远, 等. 全封闭煤棚结构形式与选取原则[J]. 施工技术, 2020, 49(8): 81-86.

[3] 中国建筑科学研究院. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[4] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[5] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[6] 中国建筑科学研究院有限公司. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[7] 中国建筑科学研究院. 建筑工程抗震设防分类标准: GB 50223—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[8] 鞍钢股份有限公司, 冶金工业信息标准研究院, 首钢总公司河钢股份有限公司唐山分公司, 等. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[9] 冶金工业信息标准研究院, 石家庄钢铁有限责任公司, 福建省三钢(集团)有限责任公司, 等. 优质碳素结构钢: GB/T 699—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[10] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.