黄骅港散货堆场罩棚形式比较研究

张春雨
（河北港口集团有限公司，河北 秦皇岛 066000）

摘要：目前比较散货堆场罩棚形式多聚焦于结构安全性指标或施工工期及建设投资等初期指标，未对全生命周期建设、生产及运维等多方面进行综合比较。依托黄骅港新建散货堆场罩棚项目，基于堆场罩棚 50 a 设计工作年限，针对气膜结构、平板网架屋盖+防风网结构及拱形预应力桁架结构三种建筑结构形式，从设计建造、生产运营、使用维护三方面进行分项剖析和综合比较。结果表明：采用拱形预应力桁架结构形式在 9 种分项对比中 7 项占优，该结构散货堆存量大，生产运营适用性好，使用维护成本低，环保效能优，职业卫生环境友好，是着眼 50 a 设计工作年限全生命周期经济指标及环保效能的合理选择。比较研究中建立的分项综合比较体系及方法可为同类型堆场罩棚项目提供借鉴和参考。

关键词：散货堆场；罩棚形式；设计工作年限
中图分类号：U65　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0089-09

Comparative study on shed forms for bulk cargo storage yards at Huanghua Port

ZHANG Chunyu
(Hebei Port Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Current comparisons of shed forms for bulk cargo storage yards often focus on structural safety indicators or initial metrics such as construction duration and investment costs, without conducting a comprehensive assessment across the entire lifecycle, including construction, operation, and maintenance. Based on the new bulk cargo storage yard shed project at Huanghua Port, and considering a design working life of 50 years for the yard shed, this study analyzes and compares three structural forms: air-supported membrane structures, flat grid roof with windbreak net structures, and arched prestressed truss structures. The comparison is conducted from three perspectives: design and construction, production and operation, as well as usage and maintenance. The results show that the arched prestressed truss structure outperforms the other two in seven out of nine comparative items. It provides the large storage capacity for bulk cargo, the suitability for production and operation, the low usage and maintenance costs, the excellent environmental performance, and the favorable occupational health and hygiene conditions. Therefore, it represents a rational choice for optimizing economic indicators and environmental performance over the 50-year design working life. The itemized comprehensive comparison system and methodology established in this study can serve as a reference for similar yard shed projects.

Keywords: bulk cargo stock yard; shed form; design working life

随着我国生态文明建设持续推进，港口干散货堆场的扬尘污染管控已成为港口绿色转型的核心任务。国务院于 2023 年 11 月 30 日发布的《空气质量持续改善行动计划》[1]，明确提出“到 2025 年，城市大型煤炭、矿石等干散货码头物料堆场基本完成抑尘设施建设和物料输送系统封闭改造”。新建干散货码头堆场应采取全封闭措施控制粉尘污染，推动港口环保设施向长寿命、低能耗、全周期适配的方向升级。

目前部分研究已针对储料场封闭结构开展研

收稿日期：2025-12-09　　**录用日期：**2026-02-13

作者简介：张春雨(1979—)，男，硕士，高级工程师，从事港口工程战略规划与项目管理相关工作。

究，岳田等[2]利用有限元分析软件模拟堆载和地基，系统分析了储煤罩棚基础和刚性地坪桩基础的稳定性。冯成凯等[3]实测气承式膜结构煤棚调整内压下的变形，验证了对于大跨度气承式膜结构基于压力等效分析方法的可靠性。朱思宇等[4]以大跨度干煤棚为研究对象，对比柱面网架与张弦桁架的受力性能、材料用量与施工特点，说明大跨度预应力桁架在储料罩棚中的应用优势。孙树群等[5]通过工程案例验证气膜结构在堆场封闭改造中施工时间短、建设投资低的特点，说明气膜结构在堆场封闭领域大量推广的可能性。

GB 55001—2021《工程结构通用规范》[6]规定“普通房屋和构筑物设计工作年限不应低于 50 a”，一般堆场罩棚设计工作年限为 50 a。以上研究或聚焦于储料罩棚基础稳定性或结构变形等结构安全性指标、或着眼于材料用量、施工工期及建设投资等建设期的初期指标，对应港口堆场罩棚长期运营需求，覆盖设计建造、全生命周期生产运营和使用维护等多方面的分项综合比较体系有待建立。

黄骅港作为我国西煤东运、北煤南运的核心枢纽港口，腹地干散货运输需求旺盛，其新建堆场罩棚的结构选型直接关系到港口的环保效益、运营安全与长远发展。本文以黄骅港新建堆场罩棚项目为依托，针对气膜结构、平板网架屋盖+防风网结构、拱形预应力桁架结构三种主流堆场罩棚形式，从设计建造、生产运营、使用维护 3 个方面开展系统剖析，构建对应港口堆场罩棚长期运营需求，覆盖设计建造、全生命周期生产运营和使用维护等多方面的分项综合比较体系，提出适配项目的堆场罩棚形式，为同类型堆场罩棚项目提供参考依据与比较方法。

1 工程概况

堆场工程位于黄骅港散货港区规划的大型干散货作业区，其东侧紧邻已建的矿石码头一期工程，西侧靠近工作船码头。项目码头前沿方位设计充分考虑港区整体规划，与港内航道保持平行，确保了船舶通航与作业的协调性[7]。工程拟自矿石码头一期西端起点，利用规划岸线向西延伸，建设 2 个 20 万吨级专业化散货泊位，设计年通过能力为 1 680 万 t。总平面布置采用堆场平行于岸线的方案，以优化物流组织、提升作业效率，并为运营预留必要的灵活性。JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》[8]中规定黄骅港区的基本风压为 0.50 kN/m^2，地面粗糙度 A 类。场地抗震设防烈度为 6 度，设计基本地震加速度为 0.05g，设计地震分组为第三组[9]。工程区域场地土质较好，层位稳定，适宜建设堆场及罩棚[10]。

2 设计建造

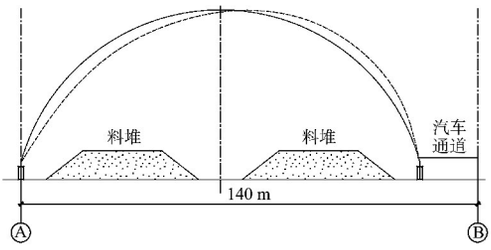
2.1 气膜结构

气膜结构体系在港口工程中应用时间较短，已建成项目较少。气膜结构中膜材通常采用 PVDF 等涂层织物[11]，通过持续向罩棚内送风，维持 200~500 Pa 的微正压，使膜面张紧成型，结合防风钢索及下部基础挡墙，形成无梁柱的大跨度空间结构，工程案例见图 1。规划建设 4 座罩棚，每个罩棚建设用地尺寸为 140 m×621 m，因需配套建设气密通道，所以建设用地利用率较低。气膜结构为柔性结构，刚度较小，风荷载是气膜结构水平变形的控制工况，200 Pa 内压下设计风荷载标准组合下变形为 1 132 mm，为正常使用极限状态的变形最值，未超过结构高度的 1/10，符合规范要求，变形形态见图 2，在极端荷载条件下(暴雪、台风等)需要依靠设备提升内部气压以保证承载能力。

图 1 气膜结构工程案例

Fig. 1 Engineering case of air-supported membrane structure

水运工程



图中虚线示意变形。

图 2　气膜结构水平变形

Fig. 2　Lateral deformation of air-supported membrane structure

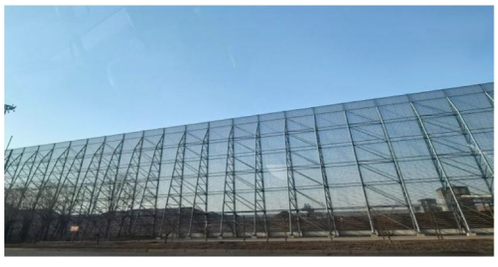
气膜结构主要构件可在工厂预制，现场安装工作量小，无需大型吊装设备，建设周期短，施工便利。膜结构质量轻，对地基承载力要求较低，一般浅基础可满足承载要求。气膜结构施工周期较短，通常为 4～6 个月，有利于缩短总工期。气膜结构初期建设投资较低，单位面积造价约 700 元。

2.2　平板网架屋盖+防风网结构

平板网架屋盖及防风网结构在港口工程中应用较多，较为常见。平板网架屋盖+防风网结构采用正交正放四角锥网架构成大跨度屋盖[12]，顶部以彩钢板封闭，四周以约 14 m 高的防风抑尘网进行围护，形成“上有盖、四周网”的半封闭空间，工程案例见图 3。结构由钢筋混凝土柱支承，结合以往工程经验，柱网尺寸普遍不大于 80 m×80 m，建设用地利用率较低。平板网架屋盖+防风网结构为刚性结构，刚度较大，计算竖向荷载下变形为 226 mm，未超过跨度的 1/250[12]，符合规范要求，变形形态见图 4，承载能力与结构材料、布置等特性相关，不依靠设备。

平板网架屋盖+防风网结构建设和外围护结构铺设工程量较大，施工周期较长，施工周期约为 8～12 个月，初始建设投资较高，单位面积造价约 1 150 元。

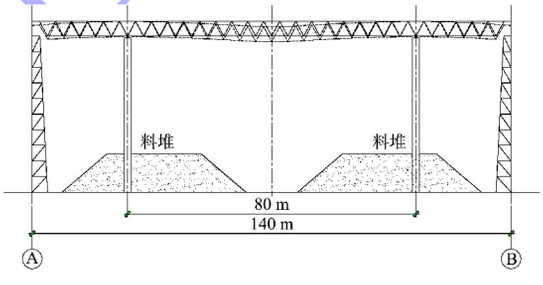
a) 平板网架结构



b) 防风网结构

图 3　平板网架屋盖结构及防风网结构工程案例

Fig. 3　Engineering case of flat grid roof structure and windbreak net structure



图中虚线示意变形。

图 4　板网架屋盖+防风网结构竖向承载变形

Fig. 4　Vertical load-bearing deformation of flat grid roof with windbreak net structure

2.3　拱形预应力桁架结构

拱形预应力桁架结构由拱桁架与预应力拉索两部分结合组成，结构体系比较成熟，工程案例见图 5，在港口工程中应用较多。规划建设 4 座罩棚，每个罩棚建设用地尺寸为 140 m×621 m，建设用地面积较充分利用，拱形预应力桁架结构外部布置围护结构，实现堆场全封闭的设计目标。拱桁架跨越能力强，净空高，刚度高，预应力索可以

优化内力分布，降低桁架端部水平推力，提高拱桁架的承载能力，计算竖向荷载下变形为 327 mm，未超过跨度的 1/250，符合规范要求，为水平变形及竖向变形最值，变形形态见图 6，承载能力同样与结构材料、布置等特性相关，不依靠设备。

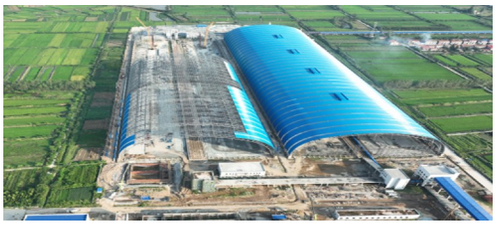
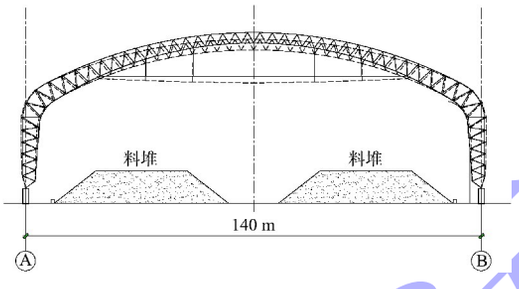


图 5　拱形预应力桁架结构工程案例
Fig. 5　Engineering case of arched prestressed truss structure



图中虚线示意变形。

图 6　拱形预应力桁架结构竖向承载变形
Fig. 6　Vertical load-bearing deformation of arched prestressed truss structure

拱形预应力桁架结构的吊装、拼装和预应力张拉工艺复杂，需要专业的施工队伍和大型吊装设备，施工风险和控制难度较大，施工技术要求高，施工周期同样约为 8~12 个月。该项目拱形预应力桁架结构罩棚跨度 140 m，初始建设投资较高，每平米造价约 1 650 元，高于其他两种结构体系。

2.4　对比分析

气膜结构属于较新的结构体系，依靠设备送风维持内外压差保证结构形态和承载能力，刚度较小，目前在港口工程散货堆场罩棚建筑中应用较少，长年限下耐久性及安全性缺乏实际工程参考，其在施工周期及初始建设投资上具备优势。

防风网结构在港口工程中应用较广泛，平板网架屋盖柱网尺寸普遍不大于 80 m×80 m，结构体系比较成熟，刚度较高，平板网架屋盖+防风网结构施工周期较长，初始建设投资较高。

拱形预应力桁架结构承载能力强、设计净空高、跨度大、刚度高，在港口工程散货堆场罩棚建筑中应用较为广泛，其施工周期与平板网架屋盖+防风网结构相当，初始建设投资最高。3 种结构体系变形最值见表 1，3 种结构体系各项对比见表 2。

表 1　3 种结构体系变形最值
Tab. 1　Extreme deformation values of three structural systems

结构体系	变形最大值/mm
气膜结构	1 132
平板网架屋盖+防风网结构	226
拱形预应力桁架结构	327

表 2　3 种结构体系的施工周期及承载特性对比
Tab. 2　Comparison of construction period and bearing characteristics of three structural systems

结构体系	结构承载特性	施工周期/个月	初设建设投资/(元·m^{-2})
气膜结构	柔性结构刚度小,承载依赖设备	2~4	700
平板网架屋盖+防风网结构	刚性结构刚度高,承载不依赖设备	8~12	1 150
拱形预应力桁架结构	刚性结构刚度高,承载不依赖设备	8~12	1 650

3　生产运营

3.1　气膜结构

气膜结构内部无立柱，作业空间开阔连续，机械作业几乎无盲区，堆存布置灵活，适合大型散货堆场的集约化作业流程。然而为减少罩棚内高压空气外泄，气膜结构在两端及长向单侧配备专用气密通道以供流动机械进出，车流组织复杂，对调度管理要求高，易在进出通道形成交通拥堵，影响整体作业效率。气密通道布置见图 7，损失有效堆存面积，进而影响设计堆存量。项目罩棚区

域平面尺寸 140 m×621 m，相较于拱形预应力桁架结构，设计堆存损失量为 0.4 万 t，对应 4 座罩棚，堆场总设计堆存损失量为 1.6 万 t。

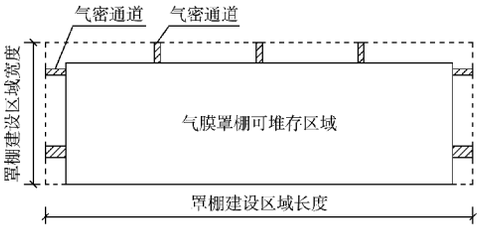


图 7　气膜结构堆存区域布置

Fig. 7　Storage area layout of air-supported membrane structure

气膜结构需风机 24 h 不间断运行以维持正压，持续消耗电力。系统高度依赖风机、传感器和智能控制系统，进风系统故障会影响结构安全与正常作业，运维保障压力较大。气膜结构内进出大件机械或扩建罩棚需要在气膜结构泄压后实施，对堆场运输和生产均有影响。

3.2　平板网架屋盖+防风网结构

平板网架屋盖+防风网结构罩棚堆场可与道路直接连通，流动机械进出自由，作业模式传统，适应性强，延续现有露天或半露天通用堆场的作业习惯和组织模式。平板网架屋盖+防风网结构为刚性结构体系，易与现有堆场的防风网结合进行改造升级，也便于未来根据需求调整封闭范围，改造更加灵活方便，进出大件机械或扩建罩棚对原堆场区域生产基本无影响，此方面优于气膜结构。因为柱网及净高限制，此种结构体系不适合布置一般堆场通用的堆取料机，对大型机械的作业流畅性也有一定影响，降低了堆场有效利用率。

平板网架屋盖+防风网结构受跨度限制，柱网尺寸普遍不大于 80 m×80 m，内部立柱布置见图 8，堆取料有效面积受影响较大。相较于拱形预应力桁架结构，堆场总设计堆存损失量为 3.0 万 t。

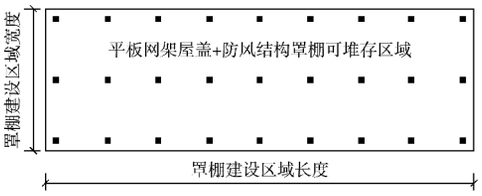


图 8　平板网架屋盖+防风网结构堆存区域布置

Fig. 8　Storage area layout of flat grid roof structure with windbreak net structure

3.3　拱形预应力桁架结构

拱形预应力桁架结构设计跨度为 140 m，内部无柱，设计作业空间净空高、跨度大，适合堆取料机及流动机械作业，周转效率较高。其远期改造适应性较强，可改造为配备堆取料机的专业化封闭堆场，为功能转型预留兼容及升级空间。拱形预应力桁架结构与平板网架屋盖+防风网结构类似，同样为刚性结构，进出大件机械或扩建罩棚对原堆场区域生产基本无影响。

拱形预应力桁架结构设计较为复杂，跨度 140 m，属于超限结构，需进行超限审查，对设计单位能力要求高。此种内部无柱，布置见图 9，设计作业空间连续开阔，有效堆存面积及设计堆存量最大，堆场总设计堆存量为 152.5 万 t。

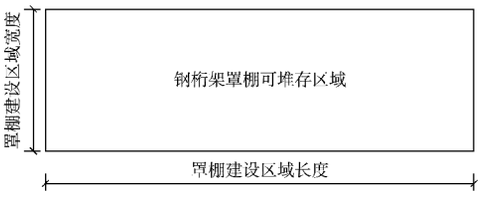


图 9　拱形预应力桁架结构堆存区域布置

Fig. 9　Storage area layout of arched prestressed truss structure

3.4　对比分析

目前黄骅港以铝矾土矿石散货为代表的散货物流需求迅猛增长，堆场堆存量的损失会带来疏港作业包干费收入损失，影响黄骅港主要生产收入，堆场设计参数及港口费用明细见表 3[13]，根据表格参数，计算 50 a 设计工作年限内堆存量相

对损失带来的费用损失 E 如下：

$$E = QTC/A \quad (1)$$

式中：Q 为相对损失堆存量；T 为设计工作年限；C 为堆存量减小引起的单位费用；A 为堆场封闭面积。

根据上式计算 3 种结构体系 50 a 设计工作年限内经济性指标，指标对比见表 4。

表 3 不同散货货种堆存指标及费用对比

Tab. 3 Comparison of storage indicators and costs for different bulk cargo types

散货	散杂货年运量比例/%	堆场货物平均堆存天数/d	库场年作业天数/d	周转次数/次	汽运疏港作业包干费用/(元·t^{-1})	堆存量减小引起的单位费用/(元·t^{-1}·a^{-1})
黏性铁矿石	6.25	40	360	9	31.70	285.30
铝矾土	93.75	18	360	20	28.70	574.00

表 4 3 种结构体系生产运营指标对比

Tab. 4 Comparison of production and operation indicators of three structural systems

结构体系	生产影响	改造潜力	堆场封闭面积/万 m^2	堆存相对损失量/万 t	50 a 设计工作年限内堆存量相对损失带来的费用损失/(元·m^{-2})
气膜结构	专用气密通道进出,对生产存在影响	进出大件机械或扩建需要提前降压,影响生产	32.2	1.6	1 381
平板网架屋盖+防风网结构	柱网尺寸 80 m×80 m,立柱附近区域,堆取料作业受影响	机械改造与扩建方便	31.7	3.0	2 631
拱形预应力桁架结构	内部无柱,作业空间开阔、连续,流动机械进出方便	机械改造与扩建方便	32.3	无	无

4 使用维护

4.1 气膜结构

气膜结构全封闭、内外存在气压差，人员进出时有明显“压耳感”，需短暂适应。用于储存散货物料时，罩棚内粉尘浓度较高[14]，从工作人员职业卫生角度考虑需配置强制排风系统[15]，然而强制排风会影响气膜承载能力，所以一般不设置。气膜结构隔热性好，夏季仓内温度高，同样无法通过强排系统换气缓解，作业人员体感闷热，容易发生中暑、热射病等职业卫生事件。气膜结构封闭性好，从根本上解决矿石物料露天堆放因风力作用产生的无组织排放粉尘，建设封闭罩棚可最大限度的减少项目营运对大气环境质量的影响，降低粉尘浓度。

气膜结构膜材设计寿命一般约为 15 a，而永久性房屋建筑物的结构设计工作年限不应低于 50 a，50 a 设计工作年限内至少需更换 3 次。经调研，气膜罩棚使用期需要风机、电力设备维持压力状态，需对设备定期维护，运维、电力、人员及设备费用约 11.40 元/(m^2·a)，50 a 设计工作年限内总费用为 570 元/m^2。膜材等易损件考虑更换及修补 3 次，单次更换费用约 285 元/m^2，50 a 设计工作年限内总费用 855 元/m^2。

4.2 平板网架屋盖+防风网结构

平板网架屋盖+防风网结构四周透气，内部自然通风条件优于全封闭结构，有助于消散散货产生的热量与湿气。平板网架屋盖+防风网结构自然通风与采光较好。防风网结构部分围护不完全封闭，在极端恶劣天气下，仍可能存在粉尘外溢风险，相较于全封闭结构，环保效能存在短板。

平板网架屋盖+防风网结构主体一次性建设，不需要外在设备系统维持结构形态。主要维护工作为钢结构常规防腐及屋面墙面板、防风网片更换及修补，港口自身维修力量即可处理。屋面墙面板和防风网片的使用寿命约 20 a，在全生命周期内需两次更换及修补，单次费用 150 元/m^2，

50 a 设计工作年限内总费用 300 元/m^2。50 a 设计工作年限内防腐防火涂料按整体重做 1 次，总费用 150 元/m^2。

4.3　拱形预应力桁架结构

拱形预应力桁架结构可以根据设计要求设计通气楼、排气窗等自然通风或强制排风设施，根据天气条件及环保要求可以选择启用通风或排风设施，罩棚内热环境可得到部分缓解，以上方面均优于气膜结构。

拱形预应力桁架结构外表面设置围护结构，同样从根本上解决矿石物料露天堆放因风力作用产生的无组织排放粉尘，建设封闭料罩棚可最大限度的减少项目营运对大气环境质量的影响，降低粉尘浓度。

拱形预应力桁架结构主要维护工作为钢结构的常规防腐及屋面墙面板更换及修补，与平板网架屋盖+防风网结构相同，50 a 设计工作年限内屋面墙面板总费用 300 元/m^2，50 a 设计工作年限内防腐防火涂料更新费用 150 元/m^2。

4.4　对比分析

3 种结构体系使用维护指标对比见表 5。气膜结构气密性强，实现了环保效能，然而其通风条件差，内部气压高，职业卫生环境与人员体验较差，气膜结构使用期间需要设备系统维持压力状态，膜材设计寿命相对较短，更换次数较多且费用较高，气膜结构综合使用维护费用高于其余两种结构体系。

平板网架屋盖+防风网结构自然通风条件好，职业卫生环境优于气膜结构，承载能力不依赖设备，使用维护费用较低，然而其围护非全封闭，环保效能存在短板。

拱形预应力桁架结构使用维护费用与平板网架屋盖+防风网结构基本一致，其围护全封闭，实现了环保效能。

表 5　3 种结构体系使用维护指标对比

Tab. 5　Comparison of operation and maintenance indicators of three structural systems

结构体系	职业卫生	环保效能	50 a 设计工作年限内运营费用/（元·m^{-2}）	50 a 设计工作年限内维护费用/（元·m^{-2}）	50 a 设计工作年限内使用维护总费用/（元·m^{-2}）
气膜结构	结构气密性强，通风条件差，内部气压高，职业卫生环境与人员体验较差	封闭性好，实现环保效能	570	855	1 425
平板网架屋盖+防风网结构	自然通风条件好，职业卫生环境优于气膜结构	非全封闭，环保效能存在短板	无	450	450
拱形预应力桁架结构	可设置自然通风或强制排风设施，职业卫生环境优于气膜结构	封闭性好，实现环保效能	无	450	450

5　分项综合比较

3 种结构体系 50 a 设计工作年限经济性指标对比见表 6，可见拱形预应力桁架结构罩棚初期建设投资最高，然而其 50 a 设计工作年限内维护费用少，50 a 设计工作年限内建设、维护及堆存量相对损失总费用最低。

综合以上分析，建立以下 9 种分项优势对比体系：结构体系应用广泛程度、承载特性、施工周期、初期建设投资费用、生产影响、改造潜力、职业卫生、环保效能、50 a 设计工作年限内建设、维护及堆存量相对损失总费用，对比结果见表 7。拱形预应力桁架结构在 9 种分项对比中 7 项占优，相较气膜结构，拱形预应力桁架结构仅在施工周期、初期建设投资费用上处于劣势，50 a 设计工作年限内建设、维护及堆存量相对损失总费用经济性指标较气膜结构低 40.1%，较平板网架屋盖+防风网结构低 50.3%，最适用于生产及改造，环保效能及职业卫生环境均为最优，是着眼长期的发展潜能及 50 a 年设计工作年限经济指标的选择。

水运工程

表 6　3 种结构体系 50 a 设计工作年限经济性指标对比

Tab. 6　Comparison of economic indicators of three structural systems within 50-year design working life

结构体系	初期建设投资/(元·m^{-2})	50 a 设计工作年限内使用维护总费用/(元·m^{-2})	50 a 设计工作年限内堆存量相对损失带来的总费用损失/(元·m^{-2})	50 a 设计工作年限内建设、维护及堆存量相对损失总费用/(元·m^{-2})
气膜结构	700	1 425	1 381	3 506
平板网架屋盖+防风网结构	1 150	450	2 631	4 231
拱形预应力桁架结构	1 650	450	无	2 100

表 7　3 种结构体系分项优劣对比

Tab. 7　Comparison of strengths and weaknesses by aspect among three structural systems

结构体系	结构体系应用广泛程度	承载特性	施工周期	初期建设投资费用	生产影响	改造潜力	职业卫生	环保效能	50 a 年设计工作年限内建设、维护及堆存量相对损失总费用经济性
气膜结构			•	•				•	
平板网架屋盖+防风网结构	•	•			•	•	•		
拱形预应力桁架结构	•	•			•	•	•	•	•

注：将 3 种结构体系中占据优势分项以“•”表示。

6　结论

1）目前罩棚建筑结构形式比较多聚焦结构安全性指标或施工工期及建设投资等初期指标。区别于现状，分项综合比较方法基于 50 a 设计工作年限，将设计建造、生产运营、使用维护 3 个方面剖解为 9 种分项，综合各分项优劣判断结果，得到更为客观及适用全生命周期的比较结论。

2）通过分项综合比较，拱形预应力桁架结构在 9 种分项对比中 7 项占优，其中 50 a 设计工作年限内建设、维护及堆存量相对损失总费用经济性指标占优较气膜结构及平板网架屋盖+防风网结构低 40% 以上，生产影响最小，环保效能最优，是响应国家生态文明建设及污染防治宏观目标，着眼港口生产和长远发展的优势建设方案。

3）后续堆场项目推进实施中进一步开展调研，更加广泛地分析归纳其他同类型港口散货堆场罩棚的比较内容和建设过程，作为推进项目建设决策的参考。

参考文献：

[1]　中华人民共和国国务院. 空气质量持续改善行动计划[EB/OL]. (2023-11-30)[2025-09-28]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202312/content_6919000.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Action plan for the continuous improvement of air quality[EB/OL]. (2023-11-30)[2025-09-28]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202312/content_6919000.htm.

[2]　岳田, 岳霖, 杜振辉. 大面积堆载作用下配煤罩棚基础及地基稳定性[J]. 水运工程, 2022(S1): 31-35.
YUE T, YUE L, DU Z H. Coal blending shed foundation and foundation stability under large-area surcharge loads[J]. Port & waterway engineering, 2022(S1): 31-35.

[3]　冯成凯, 倪仲俊, 杨凯, 等. 气承式膜结构煤棚调整内压下的实测位移响应分析[J]. 建筑结构, 2024, 54(5): 98-103.
FENG C K, NI Z J, YANG K, et al. Measured displacement response analysis of air-supported membrane structure coal shed under adjustment of internal pressure [J]. Building structure, 2024, 54(5): 98-103.

[4]　朱思宇, 梁存之, 张建林. 某大跨度煤棚结构方案选型及计算[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(5): 70-75, 97.
ZHU S Y, LIANG C Z, ZHANG J L. Structure selection and design of a large-span dry coal shed structure[J]. Progress in steel building structures, 2018, 20(5): 70-75, 97.

[5] 孙树群, 王宁. 全封闭气膜罩式环保设施在煤堆场的应用[J]. 港工技术, 2019, 56(2): 96-99.
SUN S Q, WANG N. Application of environmental protection facilities with fully enclosed membrane hood in coal yard [J]. Port engineering technology, 2019, 56(2): 96-99.

[6] 工程结构通用规范: GB 55001—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
General code for engineering structures: GB 55001-2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.

[7] 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
Design code of general layout for seaports: JTS 165-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.

[8] 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
Load code for harbour engineering: JTS 144-1-2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.

[9] 天津市北洋水运水利勘察设计研究院有限公司. 黄骅港散货港区散货码头工程岩土工程勘察报告(工可勘察阶段)[R]. 天津: 天津市北洋水运水利勘察设计研究院有限公司, 2019.
Tianjin Beiyang Water Transport & Water Resources Survey and Design Research Institute Co., Ltd. Geotechnical investigation report for the bulk cargo storage port of Huanghua Port (feasibility study stage) [R]. Tianjin: Tianjin Beiyang Water Transport & Water Resources Survey and Design Research Institute Co., Ltd., 2019.

[10] 水运工程岩土勘察规范: JTS 133—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Code for geotechnical investigation on port and waterway engineering: JTS 133-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.

[11] 充气膜结构技术规程: T/CECS 1323—2023[S]. 北京: 中国计划出版社, 2023.
Technical specification for air-inflated membrane structures: T/CECS 1323-2023 [S]. Beijing: China Planning Press, 2023.

[12] 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.
Technical specification for space frame structures: JGJ 7-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[13] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 黄骅港散货港区散货码头一期工程可行性研究报告[R]. 天津: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2025.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Feasibility study report for the first phase bulk cargo storage port of Huanghua Port [R]. Tianjin: CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., 2025.

[14] 水运工程环境保护设计规范: JTS 149—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Specifications on environmental protection design for port and waterway engineering: JTS 149-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.

[15] 工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分: 化学有害因素: GBZ 2. 1—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace: Part 1: Chemical hazardous agents: GBZ 2. 1-2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

(本文编辑　赵娟)

水运工程

欢迎投稿　欢迎订阅