



港口大型储煤筒仓的仓顶结构优化设计*

孙治林^{1,2}, 马铁柱^{1,2}, 李国豪¹, 曲军彪³

(1. 国能黄骅港务有限责任公司, 河北 黄骅 061100; 2. 河北省散料港口技术创新中心, 河北 沧州 061113;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对黄骅港煤炭港区三、四期工程筒仓的仓顶钢结构在运营过程中存在的耐腐蚀性、密封性、整体刚度问题, 进行仓顶结构优化研究。提出混凝土锥壳仓顶和改进后的钢结构仓顶两种结构方案, 并对各方案的优缺点进行对比分析。对混凝土锥壳仓顶结构方案着重进行锥壳的受力分析及施工方案研究, 提出目前国内直径最大的锥壳仓顶结构和贝雷架式钢桁架+中心立柱支撑体系; 对改进后的钢结构仓顶方案着重进行整体刚度、防腐措施、外围护板研究, 采用重防腐措施及铝镁锰板, 将钢结构防腐保护年限提高至 30 a 以上。结果表明, 两个方案均可以较好地解决存在的问题。

关键词: 大直径筒仓; 仓顶结构; 混凝土锥壳施工; 钢结构防腐措施

中图分类号: U653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0086-07

Optimization design of roof structure of large coal storage silos in ports

SUN Zhilin^{1,2}, MA Tiezhu^{1,2}, LI Guohao¹, QU Junbiao³

(1. Guoneng Huanghua Port Co., Ltd., Huanghua 061100, China;

2. Hebei Province Bulk Material Port Technology Innovation Center, Cangzhou 061113, China;

3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In view of the anti-corrosion, sealing, and overall stiffness issues of the steel structure on the top of the silo in the third and fourth phases of coal port area in Huanghua Port during operation, a structural optimization study is conducted on the silo roof structure. Two structural schemes, a concrete cone shell silo roof and an improved steel structure silo roof are proposed. The advantages and disadvantages of the two schemes are compared and analyzed. Emphasis is placed on the stress analysis and construction scheme research of the concrete cone shell silo roof structure, and the largest diameter cone shell silo roof structure and the Bailey frame steel truss+central column support system in China are proposed. The overall stiffness, anti-corrosion measures, and external maintenance plate of the improved steel structure silo roof scheme are studied with emphasis. Heavy anti-corrosion measures and aluminum magnesium manganese plates are adopted to increase the anti-corrosion protection period of the steel structure to over 30 years. The results show that both schemes can effectively solve the existing problems.

Keywords: large diameter silo; silo roof structure; concrete cone shell construction; steel structure anti-corrosion measures

黄骅港煤炭港区三、四期工程在国内煤炭港口行业创造性地采用大型筒仓群进行煤炭储运和中转, 每年煤炭装船量都超过 1.0 亿 t。运营实践

证明, 大型筒仓群堆场方案的应用发挥了筒仓绿色环保、节能高效、安全稳定及自动化控制的优势。但筒仓仍存在一些需要进一步优化研究的问题。

收稿日期: 2024-10-17

*基金项目: 国家能源集团科技创新项目(HHKJ-23-20); 黄骅港务五期工程技术开发项目(GCZX[2024]7号)

作者简介: 孙治林(1973—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

题,如仓顶采用钢结构方案存在结构变形造成卸料小车轨道变形的问题^[1];仓顶采用钢结构存在积灰及腐蚀严重、影响安全生产和耐久性问题等。

本文基于三、四期工程筒仓的仓顶钢结构存在的耐腐蚀性、密封性和整体刚度问题,开展仓顶结构方案优化研究,旨在减少后期运营维护、降低项目成本、提高建设经济性。研究成果可为五期工程及其他类似工程提供参考。

1 工程概况

黄骅港煤炭港区五期工程拟建设 18 座单仓容量 3 万 t 的筒仓,总容量 54 万 t。筒仓按 3 排 6 列布置,排净距 10 m,列净距 5 m,筒仓内径 40 m。筒仓基础采用桩筏基础,桩基为后压浆钻孔灌注桩;筒仓壁采用后张无黏结部分预应力混凝土结构,壁厚 500 mm;仓底结构采用分离式梁板结构,由支撑墙支撑;设置 6 个吊挂漏斗由支撑墙支撑。

2 筒仓的仓顶结构形式

2.1 现状

通过调查研究可知,目前筒仓的仓顶结构类型主要是现浇钢筋混凝土结构或钢结构,尚未有较为新颖的结构形式。国外大直径筒仓的仓顶结构一般采用锥壳形钢网壳或钢桁架结构形式。国内直径小于 25 m 的仓顶一般采用钢筋混凝土平顶结构,直径为 25~36 m 的仓顶一般采用钢筋混凝土锥壳结构,直径大于 36 m 的仓顶一般采用钢网壳结构。

2.2 设计条件

本文提出 40 m 直径筒仓钢筋混凝土锥壳仓顶结构方案和在三、四期筒仓基础上改进后的钢结构仓顶方案进行对比研究。

设计条件:1)自然条件。基本风压为 0.5 kN/m^2 ,地面粗糙度类别为 A 类;抗震设防烈度为 6 度,设计基本加速度为 $0.05g$,场地类别为 IV 类,按场地类别调整后的地震加速度为 $0.0625g$ 。2)荷载条件。混凝土重力密度为 25 kN/m^3 ,煤重力密度为 10 kN/m^3 ,填料重力密度为 10 kN/m^3 ;仓顶卸料

小车轮压 195 kN/个 ,皮带机支腿荷载为 25 kN/个 ,仓顶维修区荷载 5.4 kN/m^2 。3)采用 SAP2000 软件进行计算分析。

3 混凝土锥壳仓顶结构研究

3.1 结构方案概况

为减小仓顶混凝土结构跨度,采用锥壳形式收口。锥壳下口直径 40 m、高程为 45.6 m,上口直径 28 m、高程为 51.6 m,锥壳高 6 m,坡度为 45° 。上环梁、锥壳、下环梁组成的空间结构,将仓顶以上建筑物的荷载传递到仓壁。上环梁截面尺寸为 $0.8 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高),下环梁截面尺寸为 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,锥壳厚 0.5 m 。在锥壳顶设钢筋混凝土梁、板,形成钢筋混凝土顶即仓顶廊道地面。仓顶廊道地面以上设仓顶房,高 12 m、宽 13 m,采用钢筋混凝土框架结构。仓顶房填充墙采用厚 300 mm 蒸压加气混凝土条形板。仓顶房屋面板采用预制叠合楼板。结构剖面见图 1。

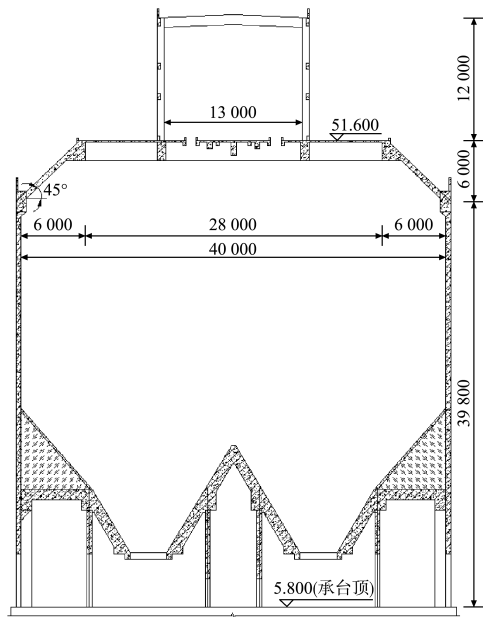


图 1 混凝土锥壳筒仓结构剖面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 1 Structural section of concrete cone shell silo (dimension: mm; elevation: m)

3.2 结构计算分析

3.2.1 混凝土锥壳计算结果

锥壳环向轴力见图 2a)。可以看出,锥壳上部环向力为压力,下部环向力为拉力。最大压力出

现在锥壳顶部,最大拉力出现在锥壳底部。锥壳环向受力自上往下由受压逐渐转为受拉。因此在锥壳底部相应位置需要配置环向钢筋抵抗拉应力。锥壳径向轴力见图 2b)。可以看出,在锥壳顶部环梁线荷载和壳壁均布荷载共同作用下,整个锥壳径向承受压力。最大压应力出现在锥壳顶部,这是因为锥壳顶部上环梁作用有较大的集中力。径向力从锥壳顶部到底部逐渐减小,这是因为截面环向周长由顶部到底部逐渐增大,压应力逐渐分散。

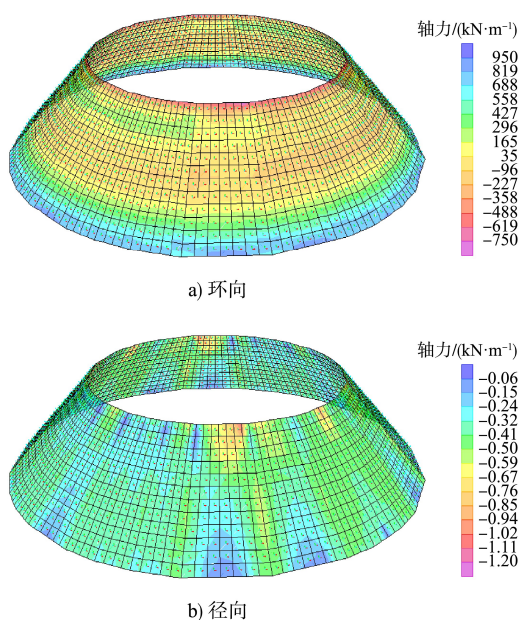


图 2 锥壳轴力
Fig. 2 Axial force of cone shell

锥壳弯矩见图 3。可以看出,弯矩最不利位置出现在锥壳顶部与上环梁交接处、锥壳底部下边缘处。上、下环梁与锥壳交接处壳体受负弯矩,锥壳中间部分承受正弯矩。

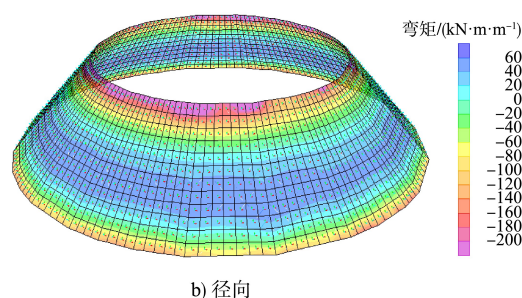
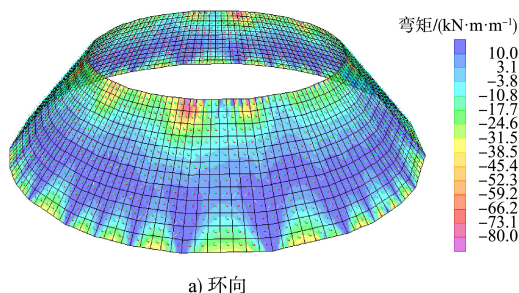


图 3 锥壳弯矩

Fig. 3 Bending moment of cone shell

从以上内力分析结果可知,锥壳主要受环向拉力和径向弯矩,需要分别配置环向和径向钢筋。局部应力集中处需要配局部抗压钢筋。

锥壳竖向位移见图 4。锥壳在荷载作用下的最大竖向位移的绝对值为 4.5 mm,位移很小,反映了锥壳结构具有很好的整体刚度。

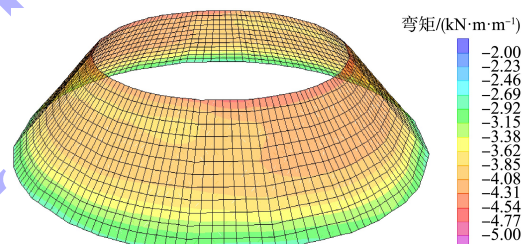


图 4 锥壳竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement of cone shell

3.2.2 仓顶廊道位移计算结果

风荷载和地震作用下的整体位移见图 5。可以看出,在风荷载作用下,廊道顶最大位移为 21.2 mm,满足 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[2]不大于 21.8 mm($H/550$, H 为层高)的要求;在地震荷载作用下,廊道顶最大位移为 13.0 mm,满足 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[3]不大于 21.8 mm($H/550$)的要求。由图 6 可知,在卸料小车荷载作用下,轨道梁最大位移的绝对值为 5.6 mm,纵向最大位移率为 $1/2\ 941$,满足卸料小车运行要求。

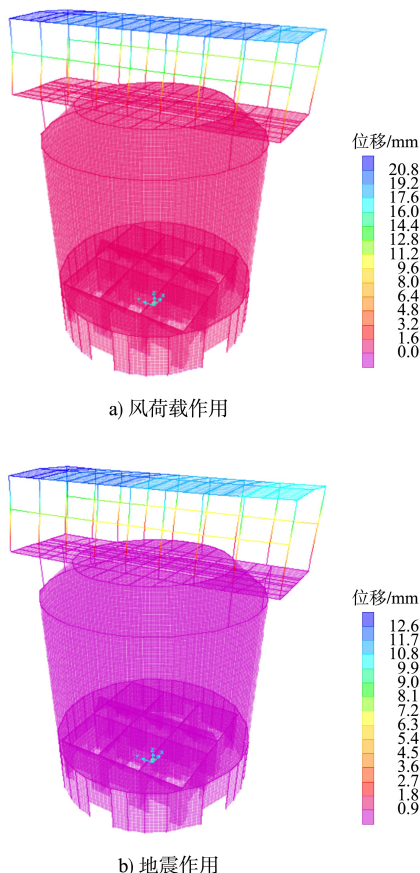


图 5 风荷载和地震作用下的整体位移
Fig. 5 Overall displacement under wind load and seismic action

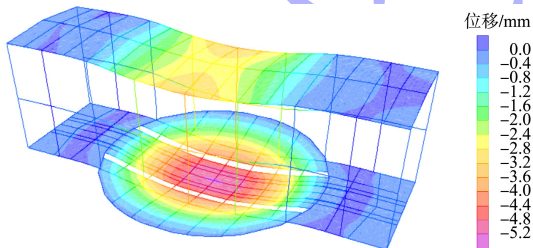


图 6 卸料小车荷载作用下仓顶廊道的位移
Fig. 6 Displacement of silo top gallery under load of unloading trolley

3.3 施工方案研究

3.3.1 研究现状

混凝土锥壳仓顶存在施工难度大的问题。早期筒仓的仓顶施工采用满堂脚手架垂直支撑体系, 存在搭设高度高、周期长、安全隐患大、钢管扣件需求量大、拆除工作量大等不足。随着工程施工技术的发展, 筒仓的仓顶支撑体系逐渐由传统的垂直支撑体系向空间水平支撑体系发展^[4]。

类似的研究有: 付汉江^[5]以 30 m 直径筒仓为例, 采用中心井架式辐射操作平台作为仓顶施工的支撑体系; 崔邯龙等^[6]将贝雷架式钢桁架+中心立柱支撑体系应用于 32 m 大直径筒仓施工中。

3.3.2 支撑体系比选

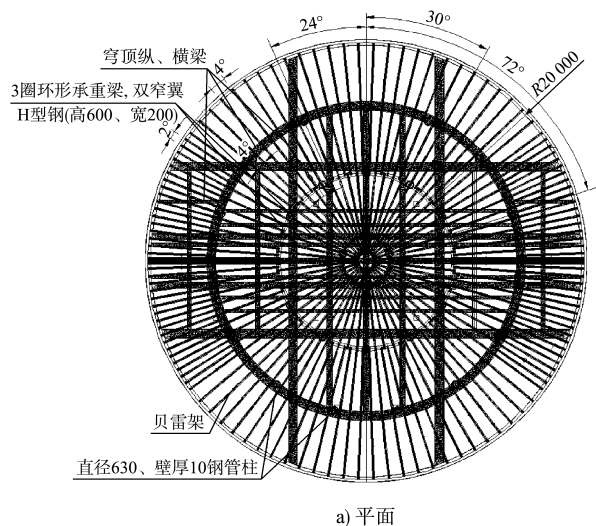
经调查研究, 混凝土锥壳筒仓采用的施工支撑体系有满堂脚手架、中心井架环式辐射状、扣件式钢管桁架与中心井架组合式、钢丝绳正交索网^[7]、伞状悬空滑模刚性平台^[8]、斜梁式滑模刚性平台、贝雷架式钢桁架+中心立柱支撑体系等。

从施工周期、支撑构件的可租赁性、与仓顶结构的适应性方面, 综合比较推荐采用贝雷架式钢桁架+中心立柱支撑。

贝雷架也被称为“装配式公路钢桥”, 原名为“321 公路钢桥”。贝雷架是形成一定单元的钢架, 可以用它拼接组装成很多构件。它具有结构简单、运输方便、架设快速、分解容易的特点, 同时具备承载能力大、结构刚性强等优点^[9]。

3.3.3 贝雷架式钢桁架+中心立柱支撑体系设计

采用单排单层加强型贝雷架, 平面上分 3 圈布置, 每榀贝雷架的长度均为 6 m。外侧 2 圈贝雷架沿环向每 4° 布置 1 榀, 内侧 1 圈贝雷架沿环向每 6° 布置 1 榀, 荷载较大处加密布置。设置 3 圈中心立柱, 内圈、中间圈、外圈直径分别为 3、15、27 m, 立柱为直径 630 mm、壁厚 10 mm 的钢管, 共 32 根。立柱之间采用联系梁连接。贝雷架平台上放置槽钢支撑上部脚手架, 见图 7。



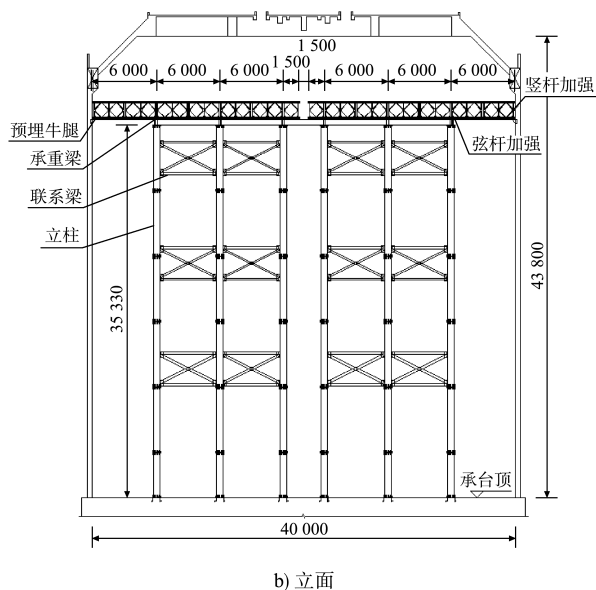


图 7 贝雷架支撑体系 (单位: mm)

Fig. 7 Bailey frame support system

4 钢结构仓顶结构研究

4.1 结构方案

在三、四期工程筒仓建设经验的基础上, 仓顶钢结构按以下方面进行改进: 1) 增加刚度, 仓顶两榀大桁架之间的地面横梁截面高度由 1.4 m 增加到 1.6 m; 2) 加强防腐措施, 采用重防腐措施, 防腐涂层的保护年限不低于 30 a; 3) 加强外围护板的耐久性, 采用铝镁锰板, 使用年限不低于 30 a; 4) 仓顶廊道地面改为钢筋混凝土地面, 满足水冲洗需求; 5) 加强细部构造做法, 改善密封性。筒仓结构三维模型见图 8。

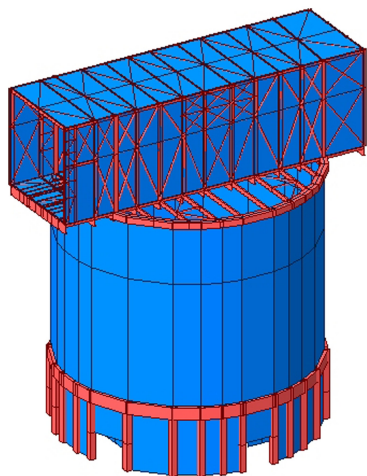


图 8 筒仓结构三维模型

Fig. 8 Three-dimensional model of silo structure

4.2 结构计算分析

风荷载和地震作用下的整体位移见图 9。可以看出, 在风荷载作用下, 廊道顶最大位移为 42 mm, 满足 JGJ 99—2015《高层民用建筑钢结构技术规程》^[10] 不大于 48 mm ($H/250$) 的要求; 在地震荷载作用下, 廊道顶最大位移为 16.8 mm, 满足 JGJ 99—2015《高层民用建筑钢结构技术规程》不大于 48 mm ($H/250$) 的要求。由图 10 可知, 在卸料小车荷载作用下, 轨道梁最大位移的绝对值为 11.9 mm, 纵向最大位移率为 1/1 327, 满足卸料小车运行要求^[11]。

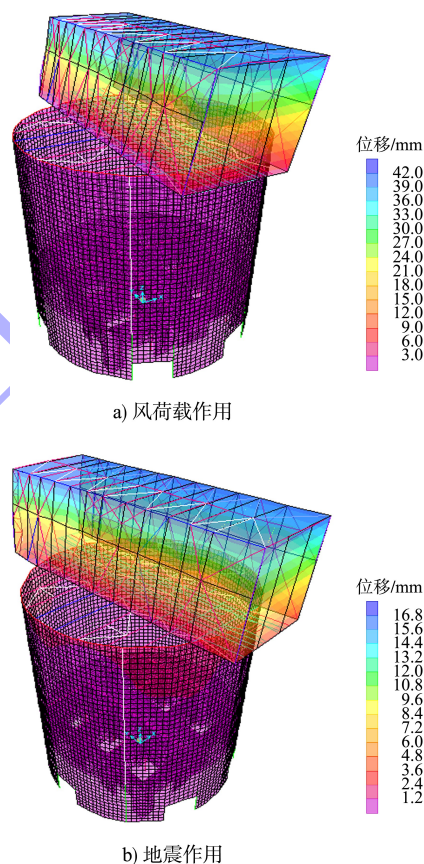


图 9 风荷载和地震作用下的整体位移

Fig. 9 Overall displacement under wind load and seismic action

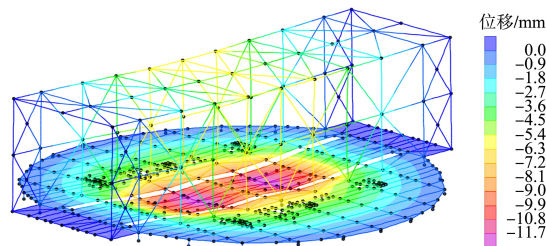


图 10 卸料小车荷载作用下仓顶廊道的位移

Fig. 10 Displacement of silo top gallery under load of unloading trolley

4.3 钢结构仓顶提高耐久性措施

4.3.1 防腐措施

为提高钢结构的耐腐蚀性,参考 JT/T 722—2023《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》^[12]的重防腐措施,并参考国内典型跨海大桥的做法,提出港口筒仓重防腐措施,防腐涂层的保护年限不低于 30 a,见表 1。

表 1 钢结构防腐做法	
Tab. 1 Anti-corrosion practice for steel structure	
使用部位	做法
室外露天环境及仓顶廊道地面以下等不易重新涂装的部位	电弧喷铝合金,厚 150 μm;环氧封闭漆底漆两道,渗入涂层孔隙,不计厚度;环氧云铁中间漆 1 道,厚 100 μm;氟碳面漆两道,厚 80 μm。总厚度 330 μm
室内环境及仓顶廊道地面以上构件等较易重新涂装的部位	无机富锌底漆 1 道,厚 75 μm;环氧封闭漆 1 道,渗入孔隙不计厚度;环氧云铁中间漆两道,厚 225 μm;氟碳面漆两道,厚 80 μm。总厚度 380 μm

4.3.2 外围护板

钢结构外围护板常采用普通彩钢板,实践证明港口建筑物彩钢板易腐蚀、使用年限短,一般 5~10 a 就需要更换。耐久性好的外围护板有铝镁锰板和钛锌板。钛锌板造价高,经济性不佳。铝镁锰板造价适宜、耐久性好,对风荷载要求不高的地区适宜采用。铝镁锰板正常使用年限不低于 30 a,同时具有较好的外观效果,有利于提升环境质量^[13]。

5 结构方案比较

通过以上研究可知,两个仓顶结构方案均能满足规范要求,但是在耐腐蚀性、密封性、整体刚度、施工难度、施工周期等方面各有优势,见表 2。

表 2 结构方案对比						
Tab. 2 Comparison of structural schemes						
结构方案	耐腐蚀性	密封性	整体刚度	施工难度	施工周期	运营维护
混凝土锥壳仓顶	主体结构正常使用可满足 50 a 耐久性要求,外墙抹灰需采用耐久性好的水性氟碳漆涂料,可使用 20 a	采用现浇混凝土,无缝隙,密封性好	通过设置锥壳,筒壁内径由 40 m 缩至 28 m,从而减小钢筋混凝土梁的跨度,提高了仓顶整体刚度,卸料小车荷载作用下,轨道梁最大位移为 5.6 mm,纵向最大位移率为 1/2 941	目前无直径 40 m 的锥壳施工方案,施工难度大;混凝土锥壳仓顶推荐采用贝雷架式钢桁架+中心立柱支撑体系	施工周期长,单排仓施工周期约 14.5 个月	后期主要是室内外装饰做法的维护
钢结构仓顶	主体结构按正常使用年限 50 a 设计,防腐采用重防腐措施、外围护板采用耐腐蚀的铝镁锰板,防腐保护年限可达 30 a	取决于细部构造做法,能够达到较好的密封性	通过加大钢梁截面,提高整体刚度,在卸料小车荷载作用下,轨道梁最大位移为 11.9 mm,纵向最大位移率为 1/1 327	有三、四期工程施工先例,施工技术成熟	施工周期短,单排仓施工周期约 11 个月	后期主要是钢结构防腐保护层的维护

通过对比可知,混凝土锥壳仓顶和钢结构仓顶主体结构设计工作年限均为 50 a,钢结构方案需要做钢构件的防腐维护,混凝土方案需要做外装饰涂料的维护。两个方案的密封性效果基本一致,整体刚度均可满足卸料小车正常运行对轨道变形的要求,后期均有一定的维护工作量。钢结构仓顶方案施工难度、施工风险均明显低于混凝土仓顶方案。钢结构仓顶方案比混凝土仓顶方案施工周期短 3.5 个月,在工期紧张的情况下,钢结构仓顶方案优势明显。

6 结论

- 1) 本文提出目前国内直径最大(40 m)的混凝土锥壳方案,能较好地解决筒仓仓顶结构腐蚀性、密封性和整体刚度问题,但存在施工难度大、施工安全管理风险高、施工周期长等问题。对工期要求不高的工程,可优先考虑采用。
- 2) 本文提出改进后的钢结构仓顶方案,钢结构质量轻、构件工厂化生产、绿色环保、施工难度小、施工周期短。采取措施后,仓顶耐腐蚀性、密封性和整体刚度有较好的改善。对工期要求高

的工程,可优先考虑采用。

3) 贝雷架式钢桁架+中心立柱支撑体系组成结构简单,具有较强承载能力,解决了传统施工平台搭设中心脚手架费工费时的难题,并且该平台可以满足筒仓锥壳与仓顶结构一次性浇筑,缩短施工工期,提高平台周转效率,节约成本。

4) 在借鉴已有工程防腐措施经验的基础上,根据钢构件所处的环境类别,采取不同的重防腐措施,防腐涂层的保护年限不低于 30 a。

5) 铝镁锰板材料一般应用于公共建筑,在工业建筑中外围护板采用铝镁锰板材料属于创新点,使用年限提升至 30 a,同时外观视觉效果较好,可提升环境质量。

参考文献:

- [1] 蔺雪峰,田磊,张小安,等.港口煤筒仓顶卸料小车轨道固定系统研究[J].水运工程,2020(10):87-94.
LIN X F, TIAN L, ZHANG X A, et al. Research on rail track fixing system of coal silo's unloading trolley[J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 87-94.
- [2] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Technical specification for concrete structures of tallbuilding: JGJ 3-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [3] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [4] 余监华. 新型筒仓锥壳仓顶施工组合式支撑体系研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
YU J H. Research on the new combined support system used for construction of cone-shell-silo-roof [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [5] 付汉江. 30 m 直径筒仓中心井架环式平台滑模施工技术[J]. 科技创新导报, 2009(35): 92-93.
FU H J. 30 m diameter silo center derrick ring platform sliding form construction technology [J]. Science and technology innovation herald, 2009(35): 92-93.
- [6] 崔郎龙, 郭建行, 索晓峰, 等. 32 m 大直径群仓仓顶施工支撑体系设计研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2023(5): 120-125.
- CUI H L, CUO J H, SUO X F, et al. Design study of 32 m large diameter group silo roof construction support system[J]. Fly ash comprehensive utilization, 2023(5): 120-125.
- [7] 张卫兵, 樊世兵, 李生福. 大直径筒仓锥壳正交索网支撑体有限元分析[J]. 山西建筑, 2022, 48(23): 87-91.
ZHANG W B, FAN S B, LI S F. Finite element analysis of orthogonacable-net support for large diameter silo conical shell[J]. Shanxi architecture, 2022, 48(23): 87-91.
- [8] 苏元洪, 董吉伟, 杨富. 大直径筒仓锥壳顶板支模钢桁架滑模托带提升技术研究[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(13): 55-57.
SU Y H, DONG J W, YANG F. Technology application of lifting with slipforming steel truss used on supporting large diameter silo conical shell roof concrete formwork [J]. Building technology development, 2020, 47(13): 55-57.
- [9] 曹军, 吴赞. 采用贝雷架钢平台施工储煤仓仓顶结构技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(10): 54-57.
CAO J, WU Z. Application of Bailey truss platform in roof structure construction of coal storage silo [J]. Coal engineering, 2019, 51(10): 54-57.
- [10] 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Technical specification for steel structure of tallbuilding: JGJ 99-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [11] 田磊, 曲军彪, 张小安, 等. 重载作用下港口煤筒仓仓顶钢廊道变形分析[J]. 水运工程, 2015(6): 82-86.
TIAN L, QU J B, ZHANG X A, et al. Deformation of steel corridor at top of pre-reinforced concrete coal silo in port under heavy loading [J]. Port & waterway engineering, 2015(6): 82-86.
- [12] 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件: JT/T 722—2023[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.
Specification of protective coating for highway bridge steelstructure: JT/T 722-2023 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2023.
- [13] 郑文杰. 铝镁锰板屋面系统的应用、构造和施工[J]. 中国建筑金属结构, 2005(11): 30-33.
ZHENG W J. Application and construction of aluminum-magnesium-manganese plate roofing system [J]. China construction metal structure, 2005(11): 30-33.

(本文编辑 王璁)