



港口大型储煤筒仓仓顶钢结构防腐设计*

于洋¹, 曲军彪², 毕少男²

(1. 国能黄骅港务有限责任公司, 河北黄骅 061100; 2. 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、四期工程筒仓仓顶钢结构在运营过程中出现的严重腐蚀与维修难题, 进行了仓顶钢结构防腐研究, 旨在提出适应港口强腐蚀环境的长效防腐方案, 延长防腐保护年限和降低后期维修频率。通过现场调研与理论分析, 明确了仓顶钢结构腐蚀严重的主要原因。结合文献综述与工程案例比较, 重点探讨了金属防护与涂料防护两种技术路径, 最终提出两种防腐保护年限不低于30 a的重防腐方案。此外, 针对防腐与防火相容配套问题, 通过理论分析和工程案例研究, 提出了适用于港口筒仓的防腐防火一体化措施。针对港口强腐蚀环境, 提出的重防腐措施和防腐防火一体化措施, 可将常规10 a的防腐保护设计年限提升至30 a, 延长幅度达2倍。研究成果可为黄骅港煤炭港区五期工程及其他同类型筒仓防腐设计提供参考。

关键词: 黄骅港煤炭港区; 储煤筒仓; 仓顶钢结构; 防腐设计; 防腐防火

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0072-08

Anticorrosion design of steel structure on the top of large coal silos in ports

YU Yang¹, QU Junbiao², BI Shaonan²

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

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

Abstract: To the severe corrosion and maintenance challenges observed in the roof steel structures of the silos during the operation of Phase III and IV of the Huanghua Port Coal Terminal, this study conducts anticorrosion research on these structures. The objective is to propose long-term anticorrosion solutions suitable for the highly corrosive port environment, extending the service life of protective coatings and reducing future maintenance frequency. Through field investigations and theoretical analysis, the primary causes of severe corrosion in the roof steel structures are identified. Based on literature review and engineering case studies, metal protection and coating protection technologies are extensively evaluated, leading to the proposal of two heavy-duty anticorrosion schemes with a design service life of no less than 30 years. Furthermore, addressing the compatibility between anticorrosion and fire protection, theoretically grounded and practical engineering case studies are employed to propose integrated anticorrosion and fire protection measures suitable for port silos. In response to the highly corrosive environment of ports, heavy-duty anticorrosion measures and anticorrosion and fire prevention supporting measures are proposed, which can increase the design life of conventional anti-corrosion protection from 10 years to 30 years, with an extension of three times. The research results can provide valuable references for the anti-corrosion design of Phase V of the Huanghua Port Coal Terminal and other similar silo structures.

Keywords: the Huanghua Port Coal Terminal; coal silos; steel structure on the top of silos; anticorrosion design; anticorrosion and fire protection

黄骅港煤炭港区三、四期工程在国内煤炭港口行业创造性的采用了大型筒仓群进行煤炭储运

和转运, 每年煤炭年装船量一直维持在1.0亿t以上。运营实践证明, 大型筒仓群堆场方案的应用

收稿日期: 2025-05-20 录用日期: 2025-12-12

*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: 于洋(1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程技术管理、港口基础设施维护技术研究工作。

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优化研究的问题,如仓顶采用钢结构方案,存在钢结构腐蚀严重,影响安全生产和耐久性的问题。

本文基于黄骅港煤炭港区三、四期工程筒仓仓顶钢结构存在的腐蚀性问题,开展筒仓仓顶钢结构防腐研究,目的在于解决仓顶结构的腐蚀性问题,减少后期维修频率,降低项目成本,提高建设经济性,形成一定的创新成果,为后续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筒仓直径 40 m,高 44.9 m,单仓容量 3 万 t,按 3 排 6 列布置,共 18 座筒仓。筒仓桩基采用后压浆钻孔灌注桩,直径 1 m,筏板厚 1.7 m;筒仓壁采用部分预应力混凝土结构,壁厚 0.5 m;仓底结构采用梁板结构,梁板与筒壁分离;单仓设置 6 个卸料吊挂漏斗,漏斗由支撑墙支撑;筒仓仓顶采用钢结构。筒仓三维模型见图 1。

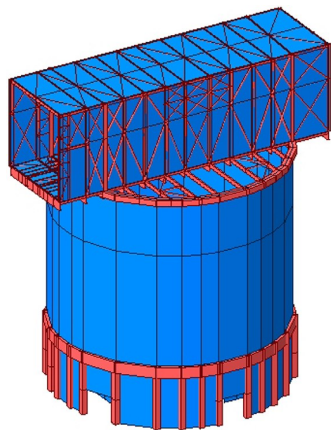


图 1 筒仓三维模型

Fig.1 3D model of the silo

2 钢结构腐蚀现象及原因分析

2.1 钢结构腐蚀现象

根据现场调研,筒仓仓顶廊道外露钢构件、电梯外露钢构件、外挂天沟、仓顶栏杆、屋面彩钢板腐蚀严重;仓顶封闭廊道内与水接触的钢构件腐蚀严重,不与水接触的钢构件腐蚀较轻。筒仓仓顶钢结构腐蚀情况见图 2。



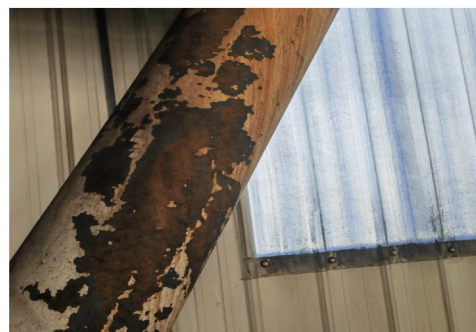
a) 廊道外露构件



b) 电梯构件



c) 天沟及栏杆



d) 室内构件

图 2 钢结构腐蚀情况

Fig.2 Corrosion of steel structures

2.2 钢结构腐蚀原因

钢铁的腐蚀是自然发生的。铁矿石最初处于稳定状态,炼成钢铁后成为不稳定状态。当处于

腐蚀环境时,钢铁会向着低能位的稳定态转化,最终回到它的稳定状态(氧化铁和铁锈)^[1]。

钢结构的腐蚀分为化学腐蚀和电化学腐蚀。化学腐蚀由钢与周围具有腐蚀性的介质发生化学作用引起,腐蚀过程中无电流产生;而电化学腐蚀在腐蚀过程中有电流产生,例如大气腐蚀、电解质溶液中的腐蚀以及土壤腐蚀^[2]。

钢铁表面的腐蚀通常发生在大气环境下,即电化学腐蚀。电化学腐蚀是由于钢铁和介质之间发生的电化学反应而引起的腐蚀现象,在腐蚀过程中形成了隔离的阴极区和阳极区,电流可以在金属内部一定距离内流动,最终在金属表面形成原电池。

港口筒仓位于海洋大气区,海洋大气湿度高,含氯离子浓度较高。高湿度的大气会增强毛细小孔的吸附作用,增加水蒸气的凝聚速率^[3]。水蒸气凝聚的同时,空气中高含量的氯离子极易溶解在钢结构表面的水膜中。氯离子具有很强的渗透力,能穿透金属的钝化膜直达底材引起腐蚀。同时,氧气是钢结构腐蚀的必备条件,由于海洋大气区具有显著的干湿循环特点,氧气供应相对充足,因此该环境下的钢构件腐蚀速度约为内陆环境的4倍。黄骅港煤炭港区主要用于煤炭的储存转运,在储存转运过程中,煤粉等固体颗粒物易飘落在钢结构上,逐渐堆积。再加上空气中的水份,促进了钢结构表面水膜的形成。此时钢结构基体为阳极,煤粉颗粒为阴极,从而发生电化学腐蚀。

综上所述,港口湿度高、氯离子富集、煤炭/粉尘浓度高等特殊环境,使得筒仓钢结构的腐蚀程度远高于内陆大气环境。

3 钢结构防腐措施

钢结构防腐技术包括金属防护、涂料防护(有机涂料和无机涂料)、有机复层包覆防护、电化学防护(阴极防护和阳极防护)^[4]以及采用耐候钢等多种方法。电化学防护措施多用于海水全浸区,有机复层包覆防护技术在浪花飞溅区的实践取得了良好的效果。耐候钢造价较高^[5]。本文着重研

究讨论金属防护和涂料防护措施,钢结构防腐涂层的主要功能是通过形成一层保护膜,防止水分、盐分及其他腐蚀介质对钢材的侵害,延长钢结构的使用寿命^[6]。

3.1 金属防护

金属防护措施包含热浸镀锌、热喷锌、热喷铝、热喷锌铝合金等,在腐蚀环境较为恶劣的沿海地区及海上钢结构建筑应用较多。一般底层采用金属喷涂,中间层和面层仍采用涂料防护,这种组合防护措施即使在恶劣的腐蚀环境中,防腐保护年限也可以达到20~30 a,而且维修时只需要对涂料部分进行维护,不需要对金属涂层进行处理。

将钢构件全部浸入溶解的锌液中,可在钢构件表面形成锌铁合金层,并覆盖上一层厚度均匀的纯锌层,从而实现钢构件与腐蚀介质的隔离。经过热浸镀锌处理的钢构件,通常能够达到20 a以上的防腐保护期,具有安全可靠、美观实用的特点,并且无需经常保养和维修,是目前最为优秀的防腐方法之一。但是采用热浸镀锌的构件在钢结构建筑中只是一些小部件,如檩条、楼梯踏板、扶手等,大型钢构件难以整体吊入溶解的锌液中,因此,主要防护方法还是采用金属热喷涂。

金属热喷涂涂层主要用于要求20~30 a防腐保护期的钢结构,多数用于桥梁、广播电视塔和水利设施等。为了使钢结构防腐保护期达到20 a以上,喷锌涂层的最低厚度为150 μm ,喷铝涂层在内陆无污染大气中可以降低至120 μm ,其他环境中至少要求在150 μm 以上。锌铝合金可显著提高防护效果,厚度为150 μm 时可以达到30 a以上的使用寿命。

3.2 涂料防护

涂料防护是通过涂装防腐涂料将钢结构与腐蚀介质隔离,以此达到防腐目的。20世纪90年代以来,随着钢结构的构建、构筑物在国内外的兴建,钢结构防腐涂料也逐渐从性能较低的醇酸漆、丙烯酸漆、聚氨酯漆发展到高性能的玻璃鳞片涂料、聚脲防腐涂料和氟碳涂料。防腐保护年限也逐渐从5、10、15 a延长至25 a以上。涂料防护

施工方便、价格适中、效果较好,在钢结构的防腐应用中最为普遍。

钢结构的防腐配套体系可以分为底漆、中间漆和面漆三部分,底漆与中间漆着重防腐性能。面漆的作用除了防腐之外,还需要具有较好的耐久性与装饰性。

为应对恶劣的腐蚀环境和延长防腐保护年限,工程界提出了重防腐涂料的概念。重防腐涂料是指在环境恶劣的腐蚀条件下,防腐蚀效果比一般防腐涂料高数倍以上的防腐蚀涂料,其特点是极高的耐腐蚀性、优异的附着力、良好的耐候性、低渗透性、机械性能强、使用寿命长。常用的重防腐涂料见表1。

表1 常用重防腐涂料

Tab.1 Commonly used heavy-duty anticorrosive coatings

类型	常用重防腐涂料
底漆	改性厚膜型醇酸底漆 环氧磷酸锌防锈底漆 环氧富锌底漆 无机富锌底漆
中间漆	环氧云铁中间漆 环氧玻璃鳞片中间漆
面漆	丙烯酸聚氨酯涂料 玻璃鳞片涂料 聚脲涂料 氟碳涂料

3.3 防腐涂料选用

3.3.1 底漆选用

在底漆的选择上,对于室外构件和不易重新涂装的部位,宜优先考虑耐久性和防腐更高的材料。采用电弧喷铝合金,防腐保护期可以达到30 a以上,且维护时仅需要对涂料部分进行维护,不需要对金属涂层基底进行处理。

对于室内构件,选取了常用的3种防腐涂料进行对比研究。改性厚膜型醇酸底漆常用于普通大气或腐蚀轻微的环境下的普通钢结构、栏杆、农用设备等;环氧磷酸锌防锈底漆常用于中等腐蚀环境的钢结构,特别是维修项目、厂房内部、设备内壁等;富锌底漆常用于重腐蚀环境下的海洋设施、港口机械、桥梁、化工厂等的长效防腐体系底漆。该工程处于港口海洋强腐蚀环境,宜

选用富锌底漆。

在富锌涂料中,通过研究无机富锌底漆与环氧富锌底漆,得出虽然环氧富锌底漆具有施工便利和柔性大的优势,但是在防腐蚀性能上,无机富锌底漆要比环氧富锌底漆更优,而且无机富锌底漆在耐热和耐溶剂、耐化学品性能以及导静电方面优于环氧富锌底漆。无机富锌底漆是一种醇溶性底漆,附着力强、快干、耐高温、施工简便、阴极保护作用突出。无机富锌底漆附着力大于10 MPa,优于环氧富锌底漆4~7 MPa;无机富锌底漆耐盐雾性大于4 000 h,优于环氧富锌底漆1 000 h,因此,综合对比后选取无机富锌底漆作为推荐的涂装底漆。

3.3.2 中间漆选用

防腐中间漆是防腐涂层体系中承上启下的关键层,其主要功能为增加涂层总厚度、提供优异的屏蔽性、增强整体防腐效果,并为面漆提供良好的附着基础。目前市场上中间漆的种类并不多,应用较多的是环氧云铁中间漆和环氧玻璃鳞片中间漆。

环氧云铁中间漆的主要成分为环氧树脂+云母氧化铁+聚酰胺固化剂。云母氧化铁是片状结构,在漆膜中层层叠加,形成“迷宫效应”,延长了水汽、氧气、腐蚀离子的渗透路径,屏蔽性好。漆膜固化后表面微观粗糙,为后道面漆提供了极佳的机械咬合作用,层间附着力强。环氧云铁中间漆还具有一定的耐紫外线能力,延缓底层环氧因粉化而失效,为施工提供了更长的窗口期。

环氧玻璃鳞片中间漆的主要成分为环氧树脂+玻璃鳞片+固化剂。玻璃鳞片是更高效的片状填料,提供的屏障效果比云铁更强,耐化学药品性也更优。漆膜固化后表面非常粗糙,会影响面漆的最终外观和流平性,耗漆量也更大。

环氧云铁中间漆是目前应用最广泛、性能最均衡的中间漆,几乎是大型钢结构项目的标配。它能很好的融入“底-中-面”三层体系,提供30 a以上的长效保护。环氧玻璃鳞片中间漆通常应用在腐蚀环境极端恶劣的区域,如储罐、管道内壁

及海水浸泡下的钢结构表面。

另外,根据 JGJ/T 251—2011《建筑钢结构防腐技术规程》^[7]的相关规定,在有机富锌或无机富锌底涂料上,宜采用环氧云铁作为中间漆。

3.3.3 面漆选用

对工业防护和高性能领域常用的4种重防腐面漆涂料的性能、应用领域、使用年限和相对成本进行比较见表2。

表2 重防腐面漆对比
Tab.2 Comparison of heavy-duty anticorrosive topcoat paints

重防腐面漆	耐老化性/h	耐盐雾性/h	耐温性/℃	附着力/MPa	装饰性	应用领域	使用年限/a	相对成本
丙烯酸聚氨酯	1 000~2 000	600~1 000	-20~120	5~10	可调色,高光泽,美观	桥梁、建筑、港口机械	8~15	中
玻璃鳞片	500~1 000	≥2 000	-20~120	10~20	涂层厚重,表面粗糙	脱硫塔、化工储罐、污水池	15~20	中至高
聚脲涂料	1 500~2 500	≥1 500	-20~120	10~25	可调色,美观性一般	水池、屋面防水、耐磨地坪	15~25	高
氟碳涂料	≥3 000	≥2 000	-40~200	5~15	色彩丰富,高光泽,持久美观	地标建筑、机场、高铁站	20~30	很高

由表2可知,4种涂料各有其独特的性能优势和适用场景。丙烯酸聚氨酯涂料是目前工业防护领域应用最广泛的面漆之一,性能均衡、成本适中,但是使用年限一般为8~15 a,难以达到30 a的防护年限,不宜采用。

玻璃鳞片涂料一般用于重化学腐蚀环境及设备内部,其缺点是表面粗糙,耐老化性能差。作为煤炭储存和运输的港口,煤灰较多,而玻璃鳞片涂料表面粗糙容易造成煤灰堆积;另外其耐候性不佳,长时间暴露在日光下会导致涂料粉化,因此常用于罐体内部不经常接触阳光部位。

聚脲涂料的优势是具有极高的弹性、耐磨性和抗冲击性,其缺点是施工工艺复杂,装饰性一般。施工时,对底材要求极端,必须绝对干燥、洁净,施工容错率极低,对工人技术和环境控制要求最高。在有防水、耐磨、抗冲击的场景下应用更为合适,在筒仓顶上难以发挥其优势。

氟碳涂料是目前耐候性最佳的涂料之一,具有耐紫外线、耐化学腐蚀和自清洁性能,其保光保色年限远超其他涂料。其在国内的发展时间久,具有成熟的防腐配套体系,在国内大型工程中应用较多^[8]。氟碳涂料还具有成熟的国家规范和行业标准进行指导约束。因此适宜采用氟碳涂料。

3.3.4 防腐配套做法

结合对防腐措施的对比研究以及 JT/T 722—

2023《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》^[9],参考国内典型跨海大桥的做法,提出港口筒仓的重防腐措施,要求防腐涂层的设计保护年限不低于30 a,具体钢结构防腐做法见表3,防腐涂层体系综合性能指标要求见表4。

表3 钢结构防腐做法
Tab.3 Steel structure anticorrosion measures

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	1)电弧喷铝合金 150 μm; 2)环氧封闭漆底漆 2道,渗入涂层孔隙,不计厚度; 3)环氧云铁中间漆 1道 100 μm; 4)氟碳面漆 2道 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	1)无机富锌底漆 1道 75 μm; 2)环氧封闭漆 1道,渗入空隙不计厚度; 3)环氧云铁中间漆 2道 225 μm; 4)氟碳面漆 2道 80 μm,总厚度 380 μm

表4 钢结构涂层体系综合性能指标
Tab.4 Comprehensive performance index of steel structure coating system

涂层耐老化性/h	涂层耐盐雾性/h	涂层耐湿热性/h	涂层黏结强度/MPa
5 000	4 000	4 000	≥5

- 注: 1. 设计保护年限 30 a。
 2. 涂层耐老化性检测应符合现行国家标准 GB/T 1865—2009《色漆和清漆—人工气候老化和人工辐射暴露(滤过的氙弧辐射)》的规定。
 3. 涂层耐盐雾性能检测应符合现行国家标准 GB/T 10125—2021《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》的规定。
 4. 涂层耐湿热性检测应符合现行国家标准 GB/T 1740—2007《漆膜耐湿热测定法》的规定。
 5. 涂层黏结强度检测应符合现行国家标准 GB/T 5210—2006《色漆和清漆 拉开法附着力试验》的规定。

4 钢结构防腐与防火配套措施

筒仓钢结构的防腐和防火均至关重要。现行规范仅单独对防腐和防火提出要求,尚未对两者协同设计作出具体规定。现有的工程实践中,对于没有防火要求的钢结构,只需专注于防腐配套体系的设计与施工即可。有些项目由于防腐要求不高,则可选择将防火涂料加相应封闭面漆作为最外层,防腐则主要靠钢结构的底漆和中间漆。针对黄骅港筒仓结构这类对于防火和防腐均有较高要求的项目,仍需进一步研究。

4.1 钢结构防腐与防火配套存在的问题

1) 防火涂料以防火功能为主,装饰性较差,因此,刷封闭面漆对于装饰效果至关重要。

2) 防火涂料的耐久性一直没有实测值,从理论上说,有机物都会老化、降解,这对防火涂料的耐久性非常不利,尤其是处在海洋大气环境中,裸露的防火涂料非常容易受到侵蚀。

3) 底漆是钢结构防腐的最后一道防线。防腐漆必须与防火涂料相兼容,两者间需有很好的附着力。

4) 当防腐面漆在防火涂料外层时,如果防火涂料采用膨胀型涂料,势必造成防腐面漆的破坏,此种情况下,如果防腐面漆的抗拉性能过强,会导致防火面漆不能顺利膨胀而无法正常隔绝火源,从而造成钢材直接升温,无法满足耐火极限的要求。

5) 防火涂料装饰性较差,耐久性尚需验证,因此需在其表面涂刷耐老化的防腐面漆,以解决耐久性问题。防腐面漆具有丰富的色彩、良好的光泽、平整光滑的外表,还可以起到装饰美化作用。若防腐面漆与防火涂料结合性不好,可在其中加入一层结合层予以解决。

4.2 钢结构防腐与防火配套应对措施

膨胀型和非膨胀型防火涂料的颜色绝大多数为白色、灰色或灰白色。防火涂料的功能成分占了配方的绝大部分,加入过多的色浆颜料会严重影响其防火性能。因此,对面层颜色有要求的建筑,需要在防火涂料外面涂刷装饰性

面漆。

膨胀型防火涂料通常为溶剂型或水性,干膜厚度几毫米,对紫外线、湿度、物理磨损比较敏感,其耐久性主要依赖保护面漆。非膨胀型防火涂料通常是水泥或石膏基,干膜厚度十几到几十毫米,质地粗糙,本身具有较好的耐久性,但是长期潮湿或水浸会使其强度降低、粉化甚至脱落,因此,也需要涂刷保护面漆来提高耐久性。

综上,从装饰性和耐久性两个方面,在防火涂料表面涂刷面漆均非常必要,而防腐面漆可兼顾装饰性和耐久性。

防腐漆与防火涂料的兼容问题主要包括4个方面:1) 溶剂冲突。如果防火涂料是溶剂型的,而防腐漆是水性的,则防腐漆中的水分会与防火涂料中的溶剂发生剧烈反应,导致起泡、皱皮、脱落。2) 固化机制冲突。某些化学固化型面漆的强溶剂型可能会软化或破坏已固化的防火涂料,影响其防火性能。3) 附着力问题。防火涂料表面多孔及光滑等特性,可能导致面漆无法有效附着,造成早期剥落。4) 柔韧性不匹配。膨胀型防火涂料在火灾时会剧烈膨胀,如面漆柔韧性不足,会阻碍防火涂料的膨胀效率。

综上所述,防腐与防火配套必须考虑兼容性、附着力、柔韧性和耐久性。要保证兼容性,需厂家提供兼容性试验报告或进行兼容性测试。附着力可通过拉开法附着力试验进行检测。耐久性需满足耐老化性、耐盐雾性、耐湿热性的指标要求(表4),柔韧性指标要求见表5。

表5 防腐面漆柔韧性指标

Tab. 5 Flexibility index of anticorrosive topcoat

项目	指标要求	测试标准
弯曲试验	通过2 mm 心轴弯曲试验	ASTM D4145
冲击试验	冲击能量 ≥ 50 kg·cm	ASTM D2794
断裂生长率	30%	ASTM D2370

4.3 钢结构防腐与防火配套工程实践案例

针对一些国内重要工程的防腐与防火一体化做法进行了研究。如:国家体育场(鸟巢)钢结构

涂装方案^[10]、呼和浩特白塔机场钢结构一体化涂装方案、哈尔滨国际会展体育中心钢结构一体化涂装方案^[11]、广东奥林匹克体育中心钢结构一体化涂装方案见表 6。

表 6 防腐防火一体化方案

Tab. 6 Anticorrosion and fire protection supporting scheme

工程	使用部位	做法
国家体育场 (鸟巢)	室外	1) 无机富锌底漆 75 μm; 2) 环氧封闭漆 25 μm; 3) 环氧云铁中间漆 50 μm; 4) 薄型防火涂料 6.5 mm; 5) 填平腻子 1 mm; 6) 环氧云铁中间漆 40 μm; 7) 氟碳面漆 25 μm; 8) 氟碳罩面漆 25 μm
	室内	1) 无机富锌底漆 75 μm; 2) 环氧封闭漆 35 μm; 3) 厚型防火涂料 26 mm; 4) 填平腻子 1 mm; 5) 环氧云铁中间漆 40 μm; 6) 氟碳面漆 25 μm; 7) 氟碳罩面漆 25 μm
呼和浩特白塔 机场	室内	1) 无机富锌底漆 80 μm; 2) 环氧云铁中间漆 100 μm; 3) 薄型防火涂料; 4) 聚氨酯面漆 60 μm
哈尔滨国际会展 体育中心	室内	1) 水性无机富锌底漆 100 μm; 2) 环氧云铁中间漆 50 μm; 3) 超薄型防火涂料 1.3~2.1 mm; 4) 丙烯酸聚氨酯面漆 30 μm
广东奥林匹克 中心	室内	1) 无机硅酸锌车间底漆 20 μm; 2) 环氧磷酸锌中间漆 50 μm; 3) 薄型防火涂料 2 mm; 4) 丙烯酸面漆 80 μm

4.4 筒仓钢结构防腐与防火配套做法

根据上述研究，推荐采用的防腐防火一体化做法见表 7。

表 7 本文案例工程钢结构防腐防火一体化方案

Tab. 7 Anticorrosion and fire protection supporting scheme for steel structure of the project

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 装部位的柱及柱 间支撑	1) 电弧喷铝合金 150 μm; 2) 环氧封闭漆底漆 2 道, 渗入涂层孔隙, 不计厚度; 3) 环氧云铁中间漆 1 道 60 μm; 4) 环氧类膨胀型钢结构防火涂料; 5) 环氧云铁中间漆 1 道 60 μm; 6) 氟碳面漆 2 道 80 μm

续表 7

使用部位	做法
室内环境及仓顶 廊道地面以上构 件等较易重新涂 装部位的梁及水 平支撑	1) 无机富锌底漆 1 道 75 μm; 2) 环氧封闭漆 1 道, 渗入空隙不计厚度; 3) 环氧云铁中间漆 2 道 125 μm; 4) 环氧类膨胀型钢结构防火涂料; 5) 环氧云铁中间漆 1 道 100 μm; 6) 氟碳面漆 2 道 80 μm
室内环境及仓顶 廊道地面以上等 较易重新涂装部 位的梁及水平 支撑	1) 无机富锌底漆 1 道 75 μm; 2) 环氧封闭漆 1 道, 渗入空隙不计厚度; 3) 环氧云铁中间漆 2 道 125 μm; 4) 环氧类膨胀型钢结构防火涂料; 5) 环氧云铁中间漆 1 道 100 μm; 6) 氟碳面漆 2 道 80 μm

5 结论

1) 港口筒仓钢结构室外构件腐蚀严重，室内与水接触的构件腐蚀严重，室内不与水接触的构件腐蚀较轻。

2) 港口筒仓钢结构处在煤炭码头和海洋大气区的双重影响下，其空气中的水分、氯离子等含量较高，因此腐蚀速率是普通大气环境的数倍；加之煤炭中的碳离子与铁离子接触，作为水溶液中的电解质，又加速了腐蚀进程，因此具有较强的腐蚀性。

3) 钢结构的防腐措施十分丰富，需要根据项目的具体情况进行分析。港口筒仓处于海洋大气环境下，采用金属热喷涂防腐措施可以达到很好的防腐效果。

4) 钢结构的防腐配套体系可以分为底漆、中间漆和面漆三部分，底漆与中间漆是防腐的最后防线，只专注于防腐性能；面漆的作用除了防腐之外，还需要具有很好的耐候性、耐久性与装饰性。

5) 通过对防腐措施的对比研究，依据 JT/T 722—2023《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》的重防腐措施，并参考国内典型跨海大桥的做法，

提出了港口筒仓重防腐措施,防腐涂层的设计保护年限不低于 30 a。

6) 钢结构的防腐和防火配套多体现在工程实践中,尚未发现有关两者一体化的规范。本文研究给出了一套煤炭港区筒仓钢结构的防腐与防火一体化做法。

参考文献:

- [1] 刘新,时虎. 钢结构防腐蚀和防火涂装[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
LIU X, SHI H. Anti-corrosion and fireproof coating of steel structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] 石磊,黄波. 钢结构防腐[J]. 中国科技信息,2005(4): 8.
SHI L, HUANG B. Anti-corrosion of steel structure[J]. China science and technology information, 2005(4): 8.
- [3] 廖莹,李娜,李连军,等. 海洋钢结构防腐蚀技术综述[J]. 四川建筑,2022,42(3): 264-269.
LIAO Y, LI N, LI L J, et al. Summary of anti-corrosion technology for marine steel structures [J]. Sichuan architecture, 2022, 42(3): 264-269.
- [4] 冯学刚,刘耕,荣仲尼. 石墨烯锌粉涂料在船闸钢结构防腐中的应用[J]. 水运工程,2023(S1): 108-112.
FENG X G, LIU G, RONG Z N. Application of graphene zinc powder coating in anti-corrosion of steel structures in ship locks[J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 108-112.
- [5] 丁志全,陈红兵,刘观发,等. 钢结构防腐技术在自动化码头工程中的应用[J]. 水运工程,2022(10): 94-98.
DING Z Q, CHEN H B, LIU G F, et al. Application of anti-corrosion technology of steel structure in automated terminal project [J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 94-98.
- [6] 张孟寿,刘超,何江,等. 海南近海钢结构防腐涂层施工技术研究[J]. 中国建筑金属结构,2025,24(6): 43-45.
ZHANG M S, LIU C, HE J, et al. Study on construction technology of anti-corrosion coating for offshore steel structure in Hainan[J]. China construction metal structure, 2025, 24(6): 43-45.
- [7] 建筑钢结构防腐蚀技术规程: JGJ/T 251—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.
Technical specification for anticorrosion of building steelstructure: JGJ/T 251-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] 李敏风,田福迅. FEVE 氟碳涂料的涂装技术[J]. 涂料技术与文摘,2015,36(11): 19-24.
LI M F, TIAN F X. Coating technology of FEVE fluorocarbon coatings[J]. Coatings technology & abstracts, 2015, 36(11): 19-24.
- [9] 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 steel structure: JT/T 722-2023[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2023.
- [10] 黄之祥. 国家体育场(鸟巢)钢结构防腐和防火涂料配套涂装[J]. 现代涂料与涂装,2008,11(7): 4-5, 8.
HUANG Z X. Coating system containing anti-corrosive coatings for steel structure and fire-proof coatings applied on the national stadium(Bird Nest)[J]. Modern paint and finishing, 2008, 11(7): 4-5, 8.
- [11] 孙成彬,孙同利. 国际会展体育中心钢结构涂装配套方案[J]. 低温建筑技术,2005,27(3): 66-67.
SUN C B, SUN T L. Steel structure coating supporting scheme for international convention and exhibition sports center[J]. Low temperature architecture technology, 2005, 27(3): 66-67.

(本文编辑 赵娟)