

石油化工设备基础结构设计的防腐蚀探讨

梁 超

河北正元化工工程设计有限公司 河北 石家庄 050031

摘 要: 在石油化工行业中,设备基础作为连接上部工艺设备与下部地基的关键承重构件,其结构安全与耐久性直接关系到整个生产装置的稳定运行。然而,石化厂区内复杂且严酷的腐蚀环境对混凝土基础结构构成了严峻挑战。本文立足于土建工程专业视角,系统探讨了石油化工设备基础在服役期间所面临的腐蚀机理、环境影响因素及现行规范要求。重点分析了从材料选择、配合比优化、结构构造细节、防护涂层体系到阴极保护等多维度的综合防腐蚀设计策略。旨在为土建工程师提供一套系统化、可操作性强的防腐蚀设计方法论,以期显著提升设备基础的服役寿命,保障石化生产设施的本质安全与长期经济效益。

关键词: 石油化工;设备基础;混凝土结构;腐蚀机理;防腐蚀设计;土建工程

引言

石油化工产业是国民经济支柱,其生产装置具有高温高压等特性,大型工艺设备通过基础与大地相连,传递荷载。设备基础作为土建工程核心,虽不直接参与化工反应,但长期处于复杂腐蚀环境。一旦严重腐蚀劣化,轻则影响结构外观与局部承载力,重则威胁工艺设备安全,造成停产、经济损失及安全环保风险。近年来,国内外石化企业因基础腐蚀引发设备事故频发,凸显基础设计阶段防腐蚀的重要性。设备基础防腐蚀设计属土建范畴,核心是保障混凝土结构完整性与耐久性,与金属设备本体防腐有本质区别。土建工程师需理解腐蚀机理并采取针对性措施。但实际工程中,防腐蚀设计常被忽视,或仅依赖“加大混凝土保护层厚度”,缺乏系统性与前瞻性,导致基础服役中后期耐久性问题频出。因此,本文旨在从土建专业的独特视角出发,深入剖析石化设备基础所面临的腐蚀挑战,系统梳理并整合当前先进的防腐蚀设计理念与技术,构建一个涵盖“腐蚀环境识别—材料性能提升—结构细节优化—主动防护体系”的全链条防腐蚀设计框架,为提升我国石化行业基础设施的建设质量和长期服役性能提供理论支撑与实践指导。

1 石油化工设备基础的腐蚀环境与机理分析

要进行有效的防腐蚀设计,首先必须精准识别腐蚀源并深刻理解其作用机理。石化设备基础主要面临以下三类腐蚀环境:

1.1 大气腐蚀环境

石化厂区大气中含有高浓度的二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、氯化氢(HCl)、氨气(NH_3)以及各类挥发性有机化合物(VOCs)。这些污染物会与空气中

的水分结合,形成酸性或碱性沉降物,持续不断地侵蚀着暴露在外的基础混凝土表面。其中,二氧化硫溶于水后形成的亚硫酸乃至硫酸,会与混凝土中的氢氧化钙发生中和反应,不仅消耗了维持钢筋钝化膜所必需的高碱性环境,加速了碳化过程,还会引发硫酸盐侵蚀。后者源于硫酸根离子与水泥水化产物中的铝酸钙反应,生成体积急剧膨胀的钙矾石或石膏,在混凝土内部产生巨大的结晶压力,最终导致结构开裂、疏松和剥落^[1]。与此同时,来自含氯工艺介质泄漏或海风携带的氯离子,凭借其强大的穿透能力,能够轻易穿过混凝土的微观孔隙直达钢筋表面。它不仅能够有效破坏钢筋的钝化膜,更会在电化学腐蚀过程中扮演催化剂的角色,形成自持的腐蚀循环,使得腐蚀速率远超普通的碳化腐蚀,对结构安全构成极大威胁。

1.2 地下/地表液相腐蚀环境

设备基础的地下部分,包括基础底板、短柱及地梁等,始终与土壤和地下水保持着直接接触,而地面以上部分也时常因设备密封失效、雨水汇集或消防喷淋等原因处于潮湿甚至浸泡状态,形成了另一条重要的腐蚀路径。土壤本身就是一个成分复杂的电解质体系,其腐蚀性强弱取决于pH值、电阻率、含水量以及硫酸盐、氯盐、镁盐等有害离子的浓度。酸性土壤可以直接溶解混凝土的胶凝物质,高硫酸盐或高氯盐土壤则分别加剧硫酸盐侵蚀和钢筋的氯离子腐蚀。更为复杂的是,某些土壤中存在的微生物,特别是硫酸盐还原菌,其代谢活动会产生硫化氢,进一步恶化腐蚀环境。此外,工艺介质的意外泄漏是石化厂最具破坏性的腐蚀源之一。强酸、强碱或有机溶剂一旦直接接触混凝土,往往能在极短时间内造成局部区域的溶胀、粉化乃至崩解,这种突发

性、高强度的腐蚀破坏对基础的完整性构成了直接而严峻的考验。

1.3 杂散电流腐蚀

除了上述化学和电化学腐蚀外，在特定区域还存在一种特殊的物理性腐蚀——杂散电流腐蚀。当设备基础邻近采用阴极保护的地下管网，或处于大功率直流电气设备（如电车轨道、电解车间）的影响范围内时，外部杂散电流可能侵入基础内部的钢筋网络。当这部分电流从钢筋某处流出并进入周围土壤时，该部位便成为阳极，发生剧烈的电化学溶解。这种由外部电流驱动的腐蚀速率极其惊人，远非自然腐蚀所能比拟，能够在短时间内造成钢筋的严重截面损失，对结构安全构成致命威胁，因此在相关区域的设计中必须予以充分考虑。

综上所述，石化设备基础的腐蚀是一个多因素耦合、多路径并存的复杂过程。土建设计必须摒弃单一思维，采取“以防为主、多道防线”的综合策略。

2 防腐蚀设计的基本原则与规范依据

针对上述复杂的腐蚀环境，国内外相关设计规范均提出了明确的防腐蚀要求。我国《工业建筑防腐蚀设计标准》（GB/T50046-2018）是指导石化建筑防腐蚀设计的核心文件。该标准根据腐蚀性介质的种类、浓度、温度及作用条件，将腐蚀等级划分为“弱、中、强、特强”四个级别，并对不同腐蚀等级下的混凝土强度等级、抗渗等级、钢筋保护层最小厚度、裂缝控制宽度等关键参数做出了强制性规定。例如，对于处于“强”腐蚀等级大气环境中的基础，规范不仅要求混凝土强度等级不应低于C40，抗渗等级不低于P8，更将基础受力钢筋的混凝土保护层最小厚度从一般环境下的40mm大幅提高至50mm甚至更多，同时对构件的最大裂缝宽度限值也提出了更为严苛的要求（如0.15mm）。此外，《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T50476）则提供了基于性能的耐久性设计方法，强调了环境作用等级、材料劣化模型和结构使用年限之间的内在联系。土建工程师在进行设备基础设计时，必须严格遵循这些规范的底线要求，并在此基础上，紧密结合具体项目的工艺特点、泄漏风险和场地地质水文条件，进行更为精细化和前瞻性的防腐蚀专项设计，确保结构在其设计使用年限内能够安全可靠地服役。

3 综合防腐蚀设计策略

基于对腐蚀机理的理解和规范要求，一套完整的设备基础防腐蚀设计应包含以下几个相互补充、层层设防的策略。

3.1 高性能混凝土材料的选择与配合比优化

混凝土作为抵御腐蚀的第一道物理屏障，其自身的密实度和化学稳定性是防腐蚀的根本所在。因此，在材料层面进行优化是提升基础耐久性的基石。在满足结构强度要求的前提下，应优先选用低热水泥或中热硅酸盐水泥，并积极掺加优质的矿物掺合料，如F类粉煤灰和粒化高炉矿渣粉。这些掺合料不仅能改善混凝土的工作性能和后期强度发展，更重要的是，它们能够有效填充混凝土内部的毛细孔隙，细化孔径分布，从而大幅降低混凝土的整体渗透性。同时，它们通过二次水化反应消耗掉易受侵蚀的氢氧化钙，生成更为稳定致密的水化硅酸钙凝胶，显著提升了混凝土抵抗硫酸盐和酸性介质侵蚀的能力^[2]。在氯离子侵蚀尤为严重的环境中，掺入硅灰可以形成极其致密的界面过渡区，构筑起一道阻止氯离子扩散的坚固壁垒。实现这一切的关键在于严格控制水胶比，通常应将其限制在0.40以下，因为这是决定混凝土密实度的最核心参数。低水胶比意味着更少的自由水蒸发后留下的孔隙通道。为了在低水胶比下仍能保证良好的施工和易性，必须依赖高效减水剂（如聚羧酸系）的应用。此外，合理选用洁净坚硬的骨料并优化其级配，必要时掺入引气剂以引入大量微小封闭气泡，都能进一步切断毛细孔通道，提升混凝土的综合抗侵蚀能力。

3.2 结构构造细节的精细化设计

再优越的混凝土材料，若缺乏合理的结构构造细节支撑，其防腐蚀效能也难以充分发挥。因此，精细化的构造设计是确保防腐蚀体系完整性的关键环节。首先，必须在规范要求的基础上，合理增大并严格保证钢筋的混凝土保护层厚度，这是延缓腐蚀介质到达钢筋表面的最基本也是最有效的措施，设计时应充分考虑施工误差并预留适当余量。其次，结构形式应极力避免积水，基础顶面、支墩及地坑底板等部位均需设计有效的排水坡度，并配套设置地漏或排水沟，确保任何泄漏液体或雨水都能被迅速疏导排走，杜绝腐蚀介质的长期滞留。基础的棱角处宜做成圆角，这不仅有助于减少应力集中，更能为后续可能施加的防护涂层提供良好的附着基面。裂缝是腐蚀介质侵入的快速通道，因此除按规范验算荷载作用下的裂缝外，还必须采取一系列构造措施来控制由收缩和温度变化引起的非结构性裂缝，例如合理设置后浇带、在基础表层配置双向防裂钢筋网等^[3]。最后，预埋件与地脚螺栓作为金属与混凝土的交界处，往往是腐蚀的薄弱点，必须给予特殊关注，采用热浸镀锌、达克罗处理等可靠的防腐工艺，并在安装后用耐腐蚀的无收缩灌浆料严密填充螺栓孔，彻底隔绝腐蚀路径。

3.3 表面防护涂层体系的应用

当面对极为严酷的腐蚀环境,或项目对基础的耐久性有超长服役年限(如五十年以上)的特殊要求时,仅依靠混凝土自身的防护能力便显得捉襟见肘。此时,施加一套高性能的表面防护涂层体系,就成为构筑主动、可靠且可维护的化学屏障的必要手段。涂层体系的选择必须建立在对具体腐蚀介质类型(酸、碱、溶剂)、作用温度范围和预期寿命的精准评估之上。环氧树脂涂层因其卓越的附着力、耐化学性和机械强度,常被用作底漆和中间漆;聚氨酯面漆则以其出色的耐候性和保色性,适用于户外面漆;而对于存在强酸、强碱或有机溶剂泄漏风险的区域,乙烯基酯树脂涂层或玻璃鳞片胶泥则展现出无与伦比的抵抗力,其内部的玻璃鳞片能形成迷宫效应,极大地延长腐蚀介质的渗透路径;聚脲弹性体则凭借其快速固化、无缝高弹的特性,适用于需要快速修复或对韧性要求高的场合。然而,涂层的成功绝非简单地“刷上去”即可,它是一个高度系统化的工程。设计文件必须明确规定涂层体系的完整构成、各层及总干膜厚度、以及相应的技术性能指标^[4]。施工前,混凝土基面必须经过严格的喷砂或抛丸处理,达到Sa2.5级的清洁度和规定的粗糙度(锚纹深度),这是涂层能否长久附着的生命线。整个施工过程必须由具备专业资质的队伍执行,并辅以全过程的质量监理,确保每一道工序都符合设计要求。

3.4 阴极保护技术的探索性应用

对于那些完全处于地下或长期浸泡在电解质溶液中的基础部分,例如沿海地区的海水冷却塔基础或地下储罐基础,可以借鉴海洋工程领域的成熟经验,探索性地应用阴极保护(CP)技术作为防腐蚀的最后一道终极防线。该技术通过向基础内的钢筋网络施加一个外部阴极电流,强制将其电位负移到热力学稳定的免蚀区,从而从根本上抑制电化学腐蚀的发生。尽管目前在常规石化设备基础中应用尚不普遍,且初期投资成本较高,但对于那些位置关键、一旦损坏后维修极其困难或处于极端

腐蚀环境中的基础而言,阴极保护不失为一种具有前瞻性的技术储备,能够为结构提供近乎永久的保护。

4 结语

石油化工设备基础的防腐蚀设计是一项涉及材料、构造、工艺等多个维度的系统工程,绝非依赖单一技术手段所能圆满解决。土建工程师必须从根本上转变观念,将结构的长期耐久性置于与承载安全性同等重要的战略地位。成功的防腐蚀设计应当建立在对项目特定腐蚀环境进行精准识别和评估的基础之上,通过优选高性能混凝土材料、实施精细化的结构构造、并在必要时施加可靠的表面防护涂层,从而构建起一个纵深配置、互为补充的多重防御体系。展望未来,随着材料科学与智能传感技术的飞速发展,设备基础的防腐蚀设计将迎来革命性的机遇。自修复混凝土技术,通过在材料内部预置微胶囊或特定微生物,能够在裂缝产生时自动触发修复反应,生成沉淀物愈合损伤;纳米改性混凝土则利用纳米二氧化硅、二氧化钛等材料,从微观层面进一步提升混凝土的密实度和功能性;而基于物联网的智能监测系统,则有望实现对基础内部温湿度、氯离子浓度、钢筋锈蚀电位等关键参数的实时感知与预警。这些前沿技术的融合应用,将推动防腐蚀模式从传统的“被动防御”向“主动感知、智能预警与自适应修复”的高级形态跨越。

参考文献

- [1]刘桐.石油化工项目中地面基础工程的质量控制与风险管理探析[J].中国石油和化工,2024,(12):45-46.
- [2]伊丽爱.石油化工大型储罐基础设计[J].化学工程与装备,2023,(12):127-131.
- [3]牛国荣.石油化工装置土建施工质量的控制策略[J].化工管理,2023,(02):165-168.
- [4]葛振冉.石油天然气管道场站土建施工常见质量问题探究[J].产业与科技论坛,2021,20(16):213-214.