

Study on the structural safety assessment and reinforcement technology of large oil and gas storage tank

Libo Zhao

Liaohe Oilfield (Panjin) Gas Storage Co., Ltd., Panjin, Liaoning, 124100, China

Abstract

With the rapid development of social economy and the continuous improvement of people's living standards, the demand for petroleum energy in various fields has soared, at the same time, the scale of oil storage and transportation engineering construction has expanded. In view of the impact of global oil price instability, after integrating various security, political and economic factors, many countries have begun to move towards the direction of large-scale oil and gas storage tanks. The safety of large oil and gas storage tanks, as the core facilities for oil and natural gas storage and transportation, is directly related to the stability of energy supply and the effectiveness of environmental protection. This paper focuses on the structural safety assessment and reinforcement technology of large oil and gas storage tanks, analyzes the structural safety problems that storage tanks may face during use, such as corrosion, fatigue, earthquake, fire and other factors, puts forward specific reinforcement measures, and discusses the latest reinforcement technology and evaluation methods. In order to provide scientific theoretical basis and technical support for the safe operation of storage tanks.

Keywords

large oil and gas storage tank; structural safety assessment; reinforcement technology

大型油气储罐的结构安全评估与加固技术研究

赵立波

辽河油田(盘锦)储气库有限公司, 中国·辽宁 盘锦 124100

摘要

随着社会经济的飞速发展和人们生活水平的不断提高,各领域对石油能源的需求量猛增,与此同时,石油储运工程建设规模在随之扩大。鉴于全球性油价不稳定因素影响,在综合各种安全、政治经济因素之后,不少国家开始朝着油气储罐大型化方向迈进。大型油气储罐作为石油、天然气等重要能源储存与运输的核心设施,其安全性直接关系到能源供应的稳定性和环境保护的有效性。本文围绕大型油气储罐的结构安全评估与加固技术展开研究,分析了储罐在使用过程中可能面临的结构安全问题,如腐蚀、疲劳、地震和火灾等因素的影响,提出了针对性加固措施,并探讨了最新的加固技术和评估方法,以期能为储罐的安全运行提供科学的理论依据和技术支持。

关键词

大型油气储罐; 结构安全评估; 加固技术

1 引言

大型油气储罐储存量和使用压力较大,可以存储大量的石油、天然气及其衍生品,所以要求具有较高的结构安全系数。但罐体结构可能会随着使用寿命的增加,以及外部环境因素的影响而出现老化、腐蚀、破坏等不同程度的现象。因此,对罐体结构及时进行安全评估,并对其进行适当加固以保证其正常运转,成为当前十分紧迫的任务。

2 大型油气储罐的常见结构安全问题

2.1 腐蚀问题

油气储罐长期暴露在空气中,容易受到如湿气、高温或化学品泄漏等环境条件以及腐蚀介质的侵蚀,储罐的金属部分会受到不同程度的腐蚀,从而导致结构强度下降。腐蚀问题将会对储罐使用寿命和安全产生直接影响。

2.2 疲劳问题

油气储罐在长期的使用过程中,尤其是在频繁装卸和温度变化的条件下,承受着周期性的应力,这些应力可能引起储罐金属材料的疲劳裂纹,尤其是在接头、焊缝等部位。疲劳裂纹如果未能及时发现并处理,可能导致储罐结构破坏甚至发生泄漏。

【作者简介】赵立波(1991-),男,中国辽宁盘锦人,本科,工程师,从事石油与天然气、油气储运研究。

2.3 地震影响

地震是影响油气储罐结构安全的外部因素之一。储罐在地震震动作用下,可能出现不规则变形或振动,特别是在震中或震源附近的地区,储罐的抗震能力较弱时,可能导致严重的结构损坏。

3 大型油气储罐的结构安全评估方法

3.1 无损检测技术

无损检测(NDT)是大型油气储罐结构安全评估中的核心技术之一,通过不破坏储罐结构的前提下,对其进行检测、分析和评估。无损检测能够提供储罐结构健康状态的实时数据,为维修、加固决策提供依据。

第一,利用超声波在材料中的传播特性来检测罐体材料的厚度、内部缺陷,是无损检测中最常用的方法之一——超声波检测技术。储罐壁面及焊接处的腐蚀、裂纹等问题,通过超声波脉冲的反射信号,可以精确定位。该技术检测效率较高,对大部分金属材料都适用,尤其适用于储罐内部或较难接触的部位。第二,射线探伤技术的工作原理在于利用高能射线照射储罐结构,根据穿透材料后射线的衰减情况来将其内部存在的缺陷分析出来^[1]。射线探伤对气孔、裂纹、夹杂物等储罐壁面及焊接接头处的缺陷进行准确识别,特别是形状较为复杂的储罐,可以将其结构是否完整以及焊接质量情况进行评估。第三,磁粉检测(MT)主要是将磁场施加于储罐表面且撒布磁粉,利用磁场不均匀的现象来对储罐表面及近表面裂纹进行检测。该方法对于焊接接头及表面缺陷尤为敏感,即便是细微的裂纹或缺陷也可以精准辨识。第四,液体渗透检测技术(PT)是在储罐表面涂抹渗透液,将其静置一段时间后,采用显像剂来将存在缺陷的部位显现出来。这一技术操作非常便捷且灵敏度高,在储罐的表面检测得到了有效地应用,尤其适用在微小裂纹、孔洞和表面裂缝的检测当中。第五,红外热成像检测技术主要是根据物体表面温度的变化来评估结构,具体而言就是通过热传导的差异来对表面是否存在裂缝、腐蚀或其他结构问题进行检测,其属于一项非破坏性检测,对于长时间处在高温或变化环境中的储罐检测具有显著的效果。

3.2 数值模拟分析

在大型油气储罐的结构安全评估中,数值模拟分析已成为重要的研究手段。通过运用计算机辅助设计(CAD)和有限元分析(FEA),可以在虚拟环境中重建油气储罐的结构模型,模拟其不同工况下的应力、变形、振动等响应。数值模拟方法能够细致地考虑储罐的复杂几何形状及材料的非线性行为,提供对储罐安全性能评估的定量分析。

首先,利用有限元方法(FEM)来离散化储罐结构,转化连续体问题成离散的数学模型。通过划分网格,特别是对钢板焊接部分、接缝和螺栓连接的应力分布分析,可以对结构的局部和整体响应进行精确模拟。数值模型可以模拟实

际使用中可能出现的极限状态,从而对内外压力、温度变化、地震震动等不同加载工况的影响进行失效分析。其次,数值模拟也可以在极端环境下应用材料本构模型来评估储罐的物质行为。例如,通过材料非线性模型可以细致地推演钢材的应力-应变关系,塑性变形和屈服准则。对于罐体受腐蚀、老化等因素影响时,也可以通过数值模拟反映材料的退化特性。此外,评价罐体安全性的重要手段还有结构动力学分析。通过模态分析和时程分析,可以揭示储罐在强震作用下的振动反应或其他动态载荷下的固有频率、振型和可能产生的共振现象,这对储罐抗震性能的评估至关重要。

3.3 可靠性分析

在大型油气储罐的结构安全评价中,可靠性分析作为一种重要的定量手段,对结构系统在不同工况下发生故障的概率,通过统计学和概率方法进行了研究^[2]。在结构可靠性理论的基础上,建立极限状态方程,计算储罐结构的可靠性指标,兼顾荷载效应和抗结构的不确定性。应用数学方法,如蒙特卡洛模拟、一次二阶矩法(FORM)、二次二阶矩法(ORM)等,分析不同的失效模式的概率。

针对荷载作用的不确定性,选取风载、雪载、地震作用、储罐内部压力等主要荷载,采用随机变量描述其统计特性。基于概率密度函数和累积分布函数,构建荷载效应模型,并结合油气储罐的几何尺寸偏差、材料力学参数变异性,建立全概率失效模型。应用随机场理论模拟焊缝缺陷、腐蚀坑分布,分析局部结构劣化对整体安全性的影响。对于抗力参数的不确定性,考虑储罐钢材的屈服强度、极限强度、弹性模量、断裂韧性等特征值的离散性,采用统计回归模型进行参数拟合。应用随机有限元方法(SFEM)对结构在随机荷载作用下的响应进行计算,结合结构可靠性灵敏度分析,识别关键控制变量。利用可靠性指标 β 评估不同工况下的结构安全裕度,并通过重要抽样法计算失效概率。在疲劳可靠性分析方面,基于Miner线性累积损伤理论,结合随机载荷谱和裂纹扩展模型,计算储罐焊接接头及应力集中区域的疲劳寿命。采用断裂力学方法,结合Paris公式和断裂韧性准则,分析裂纹扩展速率和剩余寿命。对腐蚀环境下的疲劳失效问题,应用随机腐蚀速率模型,研究腐蚀深度对疲劳可靠度的影响,并通过Bayesian更新方法优化疲劳寿命预测模型。

4 大型油气储罐的加固技术

4.1 结构加固

在大型油气储罐的结构加固过程中,为了提高储罐的整体承载能力,延缓结构劣化,减少极端工况下的故障风险,可以采用力学分析和工程实践相结合的方法进行。第一,利用外部加强环加固法来加固壁板区域。为提高罐体抗压能力,优化薄壁结构的稳定性,将环向加劲肋设置于储罐外壁。应用复合材料增强技术,将壁板包覆碳纤维增强聚合物(CFRP)或玻璃纤维增强复合材料(GFRP),以提高局

部耐腐蚀性和抗疲劳性。对于焊接接头和应力集中区域,为了减小焊接残余应力,可以将过渡板加固法与局部热处理技术联合使用^[1]。第二,应用底板增厚法来加固底板结构。该方法的原理在于将环氧树脂涂层喷涂于板表面,使用防腐涂层复合加固技术来提高底板耐腐蚀性能和承载能力。部分区域出现较为严重的腐蚀情况时,需应用底板支撑强化法,通过将加强筋或密肋结构设置于其底部来提高其力学性能以及抗变形能力。第三,应用刚性环梁加固法,针对罐顶和支承结构,在罐顶边缘加设环梁结构,以增强抗风载能力。采用柔性索加固技术,在储罐内部增设预应力索,提高抗震稳定性,降低动态荷载对结构的影响。此外还可采用高强螺栓或焊接加固法,结合局部换板技术,提高节点抗疲劳性能,恢复整体结构强度,以改善支撑结构的疲劳损伤。

4.2 抗震加固

在大型油气储罐的抗震加固过程中,针对不同结构部位的动力响应特征,采取提高整体稳定性、优化动力荷载分布、增强局部抗震能力的技术措施。在基础加固方面,采用抗液化处理技术,对软弱地基进行固结处理,采用高压旋喷桩、砂石桩或深层水泥搅拌桩提高地基承载力,降低地震时的沉降差异。对于已有基础,应用抗震剪切键加固法,在罐底与基础之间增设剪切键,提高罐体抗滑移能力。采用基础隔震技术,在基础与罐体连接处设置铅芯橡胶支座(LRB)或高阻尼橡胶支座(HDRB),降低地震能量传递,提高整体抗震性能。在罐体结构抗震方面,为了提高罐体抗屈曲能力,减小局部应力集中,可应用环向加强筋加固法,将环向加强带设置于罐壁。对于储罐顶部区域,可采取阻尼器吸能技术,将粘滞阻尼器、摩擦阻尼器或液体阻尼器设置于罐顶,将地震振动能量减小。在连接部位的加固上,在管道接口、罐体支承部位,采用抗震锚固技术,增加抗震支吊架,使管材稳定性和附属装置稳定性得到提高。金属波纹管或橡胶补偿器用于管道与罐体连接处的柔性接头技术,提高连接系统的抗震变形能力,降低罐体结构因地震荷载传递而受到的冲击。

4.3 防腐加固

在大型油气储罐的防腐加固过程中,针对不同腐蚀机理,采用提高耐腐蚀性能、降低腐蚀速率、增强结构完整性

的技术措施。对储罐壁板、底板、罐顶及焊接接头等关键部位实施材料优化、防护涂层、电化学保护及结构改造,提高长期服役能力。第一,在材料优化方面,采用高耐蚀合金钢,针对含硫原油、海洋环境及高湿度区域储罐,选用低碳贝氏体钢、不锈钢或双相不锈钢,提高耐蚀性。应用金属衬层技术,在储罐内壁复合敷设钛合金、镍基合金或铝合金层,降低介质对钢结构的化学腐蚀作用。针对局部腐蚀严重部位,采用激光熔覆技术,在材料表面形成高熔点耐蚀合金涂层,提高抗腐蚀及耐磨性能。第二,在防护涂层方面,应用重防腐涂层技术,在储罐内外壁喷涂环氧富锌涂层、聚脲涂层或高分子防腐涂层,提高防护效果。采用热喷涂技术,在罐底、焊缝及腐蚀敏感区域喷涂铝、锌或铝锌合金,提高牺牲阳极保护效果。对于长期浸泡部位,应用耐溶剂型环氧涂层,增强抗化学腐蚀能力,降低介质渗透速率。第三,在电化学保护方面,采用外加电流阴极保护技术,在储罐底板及埋地管道处安装可控电流阳极,提高电极电势,抑制电化学腐蚀。应用牺牲阳极保护法,在储罐底部布设镁阳极或锌阳极,通过自腐蚀反应降低钢结构腐蚀速率。第四,在结构改造方面,采用防腐隔离层技术,在罐底铺设高密度聚乙烯(HDPE)或玻璃钢(FRP)衬垫,减少电解质溶液接触,提高防渗透能力。应用密封焊接技术,在罐壁加强筋与主体连接部位采用连续焊接,提高结构密闭性,降低缝隙腐蚀风险。

5 结论

大型油气储罐的结构安全评估与加固技术是保障储罐安全运行的关键。通过对储罐的常见安全问题进行分析,并采用科学的评估方法和先进的加固技术,能够有效提升储罐的安全性和可靠性。随着技术的不断进步和研究的深入,未来的储罐安全管理将更加智能化和精准化,为能源安全和环境保护提供有力保障。

参考文献

- [1] 张伟.大型石油储罐主动安全防护技术的应用探析[J].山西化工, 2024, 44(3):197-198.
- [2] 文传钧.关于石油化工油气储罐大型化的研究[J].中国石油和化工标准与质量, 2024(1).
- [3] 张克政,孔天威,金广义,等.大型LNG储罐设备设施危险有害因素分析[J].山东化工, 2023, 52(10):226-228.