

Study on the Influence of Random Corrosion on the Seismic Performance of Vertical Storage Tanks

Juncheng Xin Xiang Li Bolin Wang Yiding Guo

School of Civil Engineering, Dalian University for Nationalities, Dalian, Liaoning, 116650, China

Abstract

To mitigate the impact of earthquakes on the risk of tank failure, this study focuses on a 10,000 cubic meter large vertical steel tank and proposes a coupled Monte Carlo simulation and ADINA finite element method to investigate the evolution of the tank's seismic performance under random corrosion. A fluid-structure coupled finite element model of the tank-liquid storage system is established to generate random corrosion morphologies and perform stress and acceleration time-history analysis. The results indicate that corrosion pits weaken local stiffness, induce stress concentration and local acceleration increase, and exacerbate the deterioration of the tank's dynamic performance and resonance risk.

Keywords

vertical storage tank; corrosion; numerical simulation; fluid-structure coupling

随机腐蚀对立式储罐抗震性能的影响研究

辛俊城 李想 王柏霖 郭亿丁

大连民族大学土木工程学院, 中国·辽宁 大连 116650

摘要

为了减少地震对于储罐失效风险的影响,本研究以1万方大型立式钢储罐为对象,提出蒙特卡洛模拟与ADINA有限元耦合方法,探究随机腐蚀下储罐抗震性能演化规律。建立储罐-储液流固耦合有限元模型,生成随机腐蚀形貌,开展应力及加速度时程分析。结果表明腐蚀坑造成局部刚度弱化,诱发应力集中与局部加速度升高,加剧储罐动力性能劣化与共振风险。

关键词

储罐; 腐蚀; 数值模拟; 流固耦合

1 引言

立式储罐是石油化工生产、国家能源战略储备体系中的核心储用装备,主要承担原油、成品油及各类液体化工原料的大规模安全储存任务,其结构完整性与运行可靠性直接关系到石化生产安全、能源供应稳定及生态环境保护。安徽省特种设备检测院和董娇的研究也都证明^[1-2],在长期服役过程中,储罐罐壁、底板等关键受力构件长期处于介质侵蚀、土壤腐蚀、大气腐蚀及电化学腐蚀等复杂环境作用下,

极易发生材料非均匀减薄与局部损伤,进而形成结构力学薄弱区域。

在腐蚀损伤不断发展的条件下,储罐结构力学性能劣化将进一步放大地震作用下流固耦合失效风险,显著提升储罐地震破坏概率。目前,国内学者樊海龙等已针对储液罐流固耦合、隔震减震、评测方法及抗震可靠性等方向开展了大量研究^{[3-4][5][6]}。针对腐蚀环境下的储罐结构安全问题,张如林等人的研究表明,竖向地震效应、腐蚀减薄会明显改变结构刚度与应力分布,加剧地震作用下的失效可能性^[7]。为精准揭示随机腐蚀作用对储罐抗震性能的影响规律,本研究采用ADINA有限元分析软件,建立考虑随机腐蚀减薄的储罐流固耦合数值模型,系统研究不同随机腐蚀率下储罐结构的动力响应特征、应力分布规律及抗震性能变化规律,为腐蚀环境下立式储罐的安全评估、维修决策及抗震设计提供理论依据与数值支撑。

2 储罐模型建立

为探究不同形式的随机腐蚀对储罐屈曲行为的影响,

【基金项目】大连民族大学创新创业训练计划(项目编号:202512026151)。

【作者简介】辛俊城(2004-),男,布依族,中国湖南常德人,本科,从事ADINA有限元软件的应用模拟研究。

【通讯作者】李想(1989-),男,中国黑龙江双鸭山人,博士,讲师,从事防灾减灾工程及防护工程,民族建筑数字化保护等研究。

我们参照炼油厂常规设计及施工规范，按实际比例对 1 万方容积的平底圆柱形敞口储罐进行了建模。本研究选取的储罐为立式圆柱结构，其中罐体高度 $H=11$ 米，罐体直径 $D=17$ 米，通过该尺寸组合实现 1 万方的存储容积需求。理想状态下，储罐侧壁自上而下各段厚度分别为 1.0、0.8、0.5 和 0.4 厘米，罐底板作为承载核心，厚度设定为 1.0 厘米，该储罐采用敞口设计，无固定顶板结构，图 1 展示了其几何构造及尺寸参数。

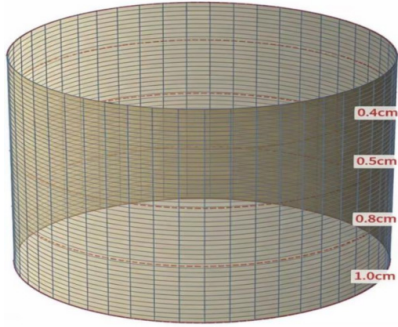


图 1 储罐几何模型示意图

2.1 单元选取及有限元模型建立

采用 ADINA 有限元分析软件对石油储罐的有限元模型进行构建与综合分析。液体采用势流体单元，罐壁采用壳单元，如图 2 和图 3 所示。为精准反映服役环境下的结构特性，建模过程中系统考虑随机腐蚀的典型腐蚀模式，并基于工程腐蚀统计规律生成多组具有代表性的随机腐蚀形态。储罐各部位的腐蚀厚度参数通过蒙特卡洛模拟方法进行概率化生成，以客观体现腐蚀分布的随机性与不确定性^[8]，储罐整体结构有限元模型如图 4 所示。

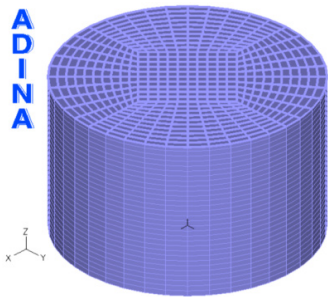


图 2 液体单元

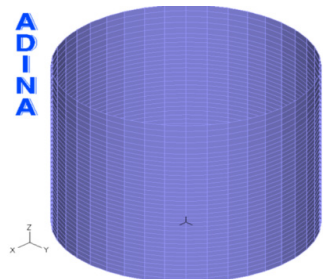


图 3 储罐罐壁单元

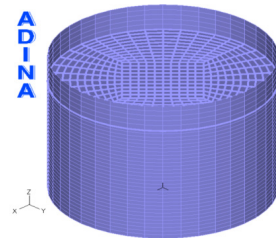


图 4 储罐整体模型

2.2 地震波输入与储罐腐蚀模拟

通过蒙特卡洛模拟在 ADINA 中实现腐蚀参数的随机化建模，其中包括了代码的二次开发，基于已有代码，开发适合于此研究的二次开发代码。本文选取第 II 类场地 El-centro 地震波，地震动中主导结构动力响应的剪切波，其传播速度慢于纵波、振动形式以横向剪切为主。该波可激发储罐产生显著动力响应与储液晃动效应，是评估腐蚀储罐抗震性能的核心地震激励，地震波时程曲线如图 5 所示。

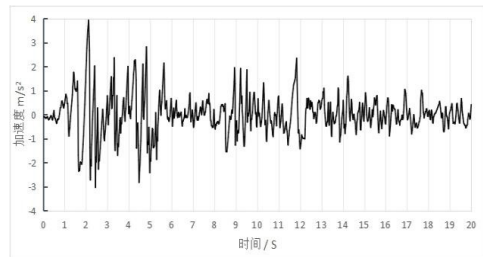


图 5 El-centro 波时程曲线

本研究探究水环境下储罐的随机腐蚀机理在地震荷载下的响应分析。将储罐罐壁的厚度参数设为变量，随机腐蚀结果如下图所示。分别为腐蚀度为 0%、20%、40%。为确保模拟可靠性，每组样本模型均采用与基准模型一致的接触设置、约束条件及荷载方案，仅变更腐蚀率相关的厚度参数，最终提取每组模型的罐壁应力等核心指标，形成统计分析数据集。

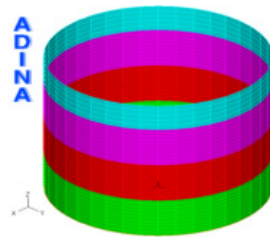


图 6 未腐蚀罐壁

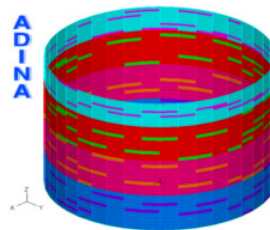


图 7 腐蚀率为 20% 的罐壁

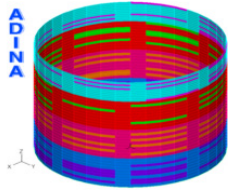


图8 腐蚀率为40%的罐壁

2.2.1 各组腐蚀应力随储罐高度结果分析

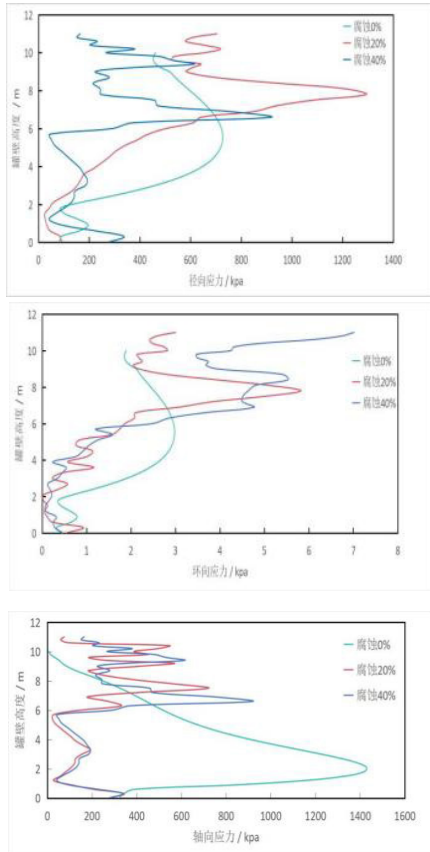


图9 不同腐蚀情况下径向，环向，轴向应力图

从图9中可以看出，不同腐蚀比例对罐壁应力分布的影响显著，随着腐蚀程度从0%提升至40%，罐壁有效厚度减小，刚度与承载能力下降，导致罐底（0~2m，厚度1cm）区域的径向、环向及轴向应力均显著升高，中上部罐壁（2~11m，厚度依次为0.8cm、0.5cm、0.4cm）的应力分布随腐蚀加剧由平滑渐变转为剧烈波动，高应力区域向上扩展，其中径向应力对腐蚀最为敏感，20%腐蚀工况下径向应力峰值突破1200kPa，增大了罐壁局部失效与屈曲破坏的风险。国内有研究通过有限元方法证实结构减薄会引发应力重新分布^[9]，这与本研究结果一致。重度腐蚀工况进一步加剧此效应，腐蚀坑密度增大使整体应力水平提升15%，底部高应力区扩展至更高高度，且分布离散度增大，验证腐蚀通过削弱材料均匀性加剧应力集中风险。应力分布规律显示，腐蚀程度增加导致罐壁应力梯度陡峭化，峰值向腐蚀区域迁移，威胁结构整体性。

2.2.2 加速度时程

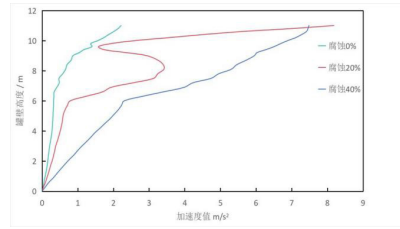


图10 沿罐壁高度加速度变化分析

从图10中可以看出，不同腐蚀状况下，储罐加速度随高度均呈现先减后增的非线性变化规律。无腐蚀时罐体刚性充足，底部加速度初始值最低，随高度快速攀升至罐顶峰值；轻度腐蚀（20%）使底部刚度下降，底部加速度放大，中段形成明显动力薄弱低谷，罐顶仍能保持较高动力响应；重度腐蚀（40%）进一步加剧结构刚度衰减，底部加速度幅值达三者最高，中段能量耗散更为显著，罐顶动力传递能力受限，整体动力风险显著提升。

3 结论

无腐蚀储罐应力中间高两端低，20%腐蚀引发局部应力集中，40%重度腐蚀提升整体应力、扩大高应力区，腐蚀程度加剧使应力梯度陡峭、峰值迁移。

腐蚀程度与储罐动力响应正相关，随腐蚀加剧，底部加速度与中段能量耗散均显著放大，罐顶动力传递能力持续减弱，结构刚度衰减引发动力响应非线性突变。

腐蚀坑造成局部刚度弱化，诱发应力集中与局部加速度升高，还改变频谱特性、降低固有频率，加剧储罐动力性能劣化与共振风险。

参考文献

- [1] 刘鹏.液化石油气储罐应力腐蚀分析及预防探讨[J].石化技术,2025,32(11):26-28.
- [2] 董娇,李青蕊.储罐底板的腐蚀与防护[J].广东化工,2013,40(21):165-171.
- [3] 樊海龙,李欣业,袁志丹,等.大型立式隔震储罐的地震响应数值模拟[J].油气储运,2021,40(01):84-89.
- [4] 李钢,郭殿豪,余丁浩.考虑流固耦合的储液结构高效地震反应分析方法[J].工程力学,1-12[2026-03-10]
- [5] 林均岐,李山有,李谊瑞,等.立式储液罐地震破坏快速评估方法[J].地震工程与工程振动,2006,(03):138-141.
- [6] 帅争峰,葛殿辉,雷咸道,等.热力耦合变液位作用下支撑刚度对熔盐储罐力学性能影响研究[J].太阳能学报,2026,47(02):205-212.
- [7] 张如林,程旭东,王淮峰,等.竖向地震作用对储液罐地震响应的影响分析[J].地震工程学报,2017,39(04):592-599.
- [8] 李昊,张猛强,尹勇,等.流固耦合方法在农业工程中的应用[J].中国农机化学报,2023,44(02):20-28.
- [9] 袁政强.巨型框架箱形节点抗震性能试验及分析.[D].重庆大学,2004.