

老旧燃气输配管道剩余强度评价方法对比及适用性优化研究

肖 鹏 阁 帅 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250002)

摘要: 随着城市燃气管道老龄化问题的加剧, 剩余强度评价成为保障管道安全运行的核心技术。本文从理论层面系统梳理了 ASME B31G、DNV-RP-F101、PCORRC、有限元分析及模糊可靠性分析等主流评价方法的核心思想、适用边界及理论局限, 结合城市燃气管道完整性管理的实际需求, 提出了基于多方法协同、数字孪生技术与数据驱动的适用性优化理论框架。通过构建“理论评估-动态建模-智能预测”的三级理论体系, 为老旧管道剩余强度评价提供了系统化的理论支撑, 助力解决评估方法与工程场景的脱节问题。

关键词: 燃气输配管道; 剩余强度; 评价方法; 适用性; 理论框架

中图分类号: TU996.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)028-0121-03

Comparison and Applicability Optimization of Remaining Strength Evaluation Methods for Old Gas Transmission and Distribution Pipelines

Xiao Peng, Yan Shuai (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250002, China)

Abstract: As the aging problem of urban gas pipelines intensifies, pipeline residual strength evaluation serves as the key technology to guarantee the safe operation of gas pipeline. This article comprehensively reviews ASME B31G from theory standpoint DNV-RP-F101、PCORRC、The general theory, applicable range and theory limit of mainstream evaluation method such as finite element analysis, fuzzy reliability analysis combined with practical requirement for urban gas pipeline integrity management to propose the theory model for applicability optimization based on multi method collaboration, digital twin, and data driven. Through developing a three-level theoretical system of “theoretical evaluation dynamic modeling intelligent prediction”, a coherent theoretical background is given to theoretical evaluation of residual strength of old pipelines, which can solve the problem of disjointness between the evaluation method and the engineering scene.

Keywords: gas transmission and distribution pipelines; Residual strength; Evaluation method; Applicability; Theoretical Framework

1 研究背景

燃气输配旧管是重要的市政基础设施, 在使用过程中会因腐蚀、破裂、应力集中等结构性缺陷问题而使剩余强度不足, 在役燃气管道特别是服役 20 年以上的管道占 30% 以上, 因剩余强度不足引发的泄露、爆炸等事故时有发生, 严重威胁公众安全和市政稳定运行。

管道剩余强度评价是通过对管道缺陷状态量化的结果评估结构承载能力的状态, 为维修更换或减压运行等管道路由决策提供参考, 是管道完整性管理不可缺少的重要环节。由于在假设条件、适用条件、复杂工况的适用性上均存在较大差异, 管道强度评价方法亟待从理论方面进行横向比对和优化。

2 剩余强度评价方法理论框架对比

2.1 基于简化力学模型的传统评价方法

2.1.1 净截面失效理论: ASME B31G 标准

ASMEB31G 的理论模型主要基于将腐蚀缺陷简化成管道壁厚均匀减薄的假设, 在薄壁圆筒线弹性力学基础上, 利用净截面应力计算失效压力。该缺陷考虑

了腐蚀部位壁厚均匀减薄的效应, 但忽略了缺陷的几何非线性(如局部鼓胀)、材料塑性形变的效应, 对缺陷长度方向尺寸上的分布效应考虑充分, 适合于长条形均匀腐蚀缺陷的快速评估, 计算简单、工程适用性强, 但缺陷几何属性(点蚀、裂纹等)的应力分布未考虑, 评估结果偏于保守, 尤其是高强钢管道, 其理论假设与材料的力学行为偏差更大。

2.1.2 断裂力学理论: DNV-RP-F101 规范

DNVRP-F101 基于断裂力学中的应力强度因子, 将失效判据分为塑性失效和断裂失效 2 种模式, 适用于含裂纹缺陷的高强度钢管。该判据考虑到材料韧性对裂纹开裂的影响, 克服了 ASMEB31G 中忽略断裂风险的问题, 但理论上的局限是对腐蚀缺陷的等效处理过于粗糙, 未考虑腐蚀坑群的交互作用以及土壤电化学腐蚀等环境因素对裂纹萌生的增强作用, 使得对多缺陷耦合工况下的评估精度较低。

2.1.3 半经验理论: PCORRC 方法

基于大量全尺寸爆破试验数据, 依据腐蚀缺陷尺寸和失效压力的拟合经验关系建立评估模型, 具有试

验数据与工程实践相结合、对规整腐蚀缺陷评估精度高等优势，但是理论本质上是一个数据驱动的黑箱理论，缺乏有效的力学机制解释，缺乏对跨工况外推适用性的分析，其外推适用性也依赖试验数据的不断积累来支撑对于新材料和新工况的应用。

2.2 基于数值模拟的精细化分析方法

非线性有限元理论：FEA 基于连续介质力学，通过对管道及缺陷几何构形进行离散化，建立包含材料非线性（塑性变形）、几何非线性（大变形）、接触非线性（土壤约束）的三维力学模型，在该类模型下，可以实现对任意缺陷构形下管道内部的应力状态及其失效过程的极其准确的模拟，在现有方法中应属于最精确的评价方法。但该类理论的应用存在很多局限性。

2.3 基于不确定性理论的可靠性分析方法

传统的简化的定性计算方法基于线弹性力学和断裂力学，工程中常常被广泛使用，该计算方法具有明显的工程便捷性，能够快速评估，为工程人员提供快速便捷的判别。但是传统的简化的计算方法具有一定局限性，它只是建立在较为理想的状态的线性材料基础上，没有考虑材料在实际工况下可能遇到的非线性行为以及多个缺陷之间的耦合交互的影响，使得其评估结果与实际情况有差别。

有限元计算方法基于非线性连续介质力学，可以非常精确地描述各种复杂工况，具有较高的精度，不管是工况参数还是极限工况参数，均可以得到较准确的分析结果，但是该方法的实现高度依赖于丰富的数据输入，数据的准确性和完整性直接关系到模拟的准确性，同时，有限元分析要求解决大量的复杂的数学问题，计算过程复杂，对计算资源和时间成本的要求比较高。

3 适用性优化的理论框架构建

3.1 多理论协同的分级评估体系

由于单一理论方法本身在评价老旧燃气输配管道剩余强度过程中存在的不足，本文探索建立的“理论互补-分级评估”框架，由三个层级组成，各层级之间共同合作以提升评估准确和效率；通过不同的理论方法在各个层级相互之间优势互补，尽量做到在提供相应的评估效率的情况下（比如：初步筛层层的快速筛查），仍然实现良好的理论严谨性（比如：机制分析层和精细验证层的详细分析和验证），同时尽量克服由于单独理论在应用过程中所带来相应可能突破的适用性边界，为老旧燃气输配管道剩余强度评价提供更加合理的评估和解决方案。

3.2 数字孪生技术的理论融合创新

物联网作为大数据网络管理的数据技术，结合现

实物理管道构建了其相对应的数字化虚拟体（即数字孪生），并融合了相应的多项理论数据，为老管道剩余寿命评价提供一定的帮助。

基于几何理论融合：管道缺陷几何特征还原方面，首次将三维激光扫描数据与 CAD 建模理论相结合。三维激光扫描可以快速、全方位地获取管道实际外形数据，准确提取管道表面细微缺陷；CAD 建模理论采用上述数据结合专业的建模软件和算法，将管道缺陷的几何形状以数字化模型的形式呈现出来，包括缺陷的位置、大小、形状等重要特征，为后文分析奠定几何基础。

多场耦合理论：为全面模拟管道的运行工况，该理论将内压载荷理论、土力学理论、传热学理论有机结合，考虑管道内部燃气压力导致管道管壁的应力、土壤作用力引起管道承受的土力学作用以及运行过程中管道产生的热量等因素。将 3 种理论有机组合可以模拟真实复杂的物理场作用，从而获得更加符合实际情况的评价。

演化机制：通过腐蚀动力学理论（如腐蚀电化学法拉第定律）和疲劳损伤理论动态仿真实现对管道腐蚀失效缺陷生长机制的动态预测，腐蚀电化学法拉第定律基于腐蚀电化学原理阐述了管道在腐蚀介质中存在的腐蚀溶解和电流迁移的反应及其相等关系，在此基础上能够确定管道腐蚀损伤速率和腐蚀损伤量。疲劳损伤理论基于材料长期交变载荷作用下的疲劳损伤，通过对管道材料的疲劳特性、积累损伤分布特性、损伤大小确定积累损伤点的损伤参数，模拟管道表面开裂缺陷（即管道疲劳失效裂纹源）的生长过程。

数字孪生的理论价值意义深远，它打破了传统评估方法的静态化、单一化局限。传统评估往往基于某一特定时刻的静态数据，且仅从单一维度或少数几个方面进行分析。而数字孪生技术通过构建“理论模型 - 实时数据 - 动态演化”的闭环体系，将实时监测获取的数据不断反馈到理论模型中，使模型能够依据最新数据动态调整，实现对管道剩余强度的时变评估，为老旧燃气输配管道剩余强度评价提供统一且高效的理论平台。

3.3 数据驱动与力学理论的协同机制

针对复杂工况下老旧燃气输配管道的评估难题，创新性地提出数据驱动方法与传统力学理论的协同理论框架。具体而言：

特征提取层：采用信号处理理论中的高级算法，例如小波分析、傅里叶变换等来对漏磁检测、超声波检测获得的数据进行分析，提取漏磁检测、超声波检测过程中缺陷的几何特征，比如缺陷长、宽、深等以

及缺陷位置处的力学特征等信息，比如应力集中系数、应变分布等，为下一步提供依据。

模型训练层：结合机器学习理论中的经典模型如随机森林利用创建多棵决策树进行投票的表决来得出最终结果，能很好的增强模型的泛化性能；神经网络通过模拟人脑的神经元的工作流程，具有很强的非线性拟合的能力，用该种模型建立缺陷特征与剩余强度之间的映射关系，解决传统理论对于此类高度非线性问题无法精准建模的问题。

理论校准层：取有限元分析这个成熟准确的数值模拟方法的计算结果作为“真值”，对比数据驱动模型的预测值和有限元计算结果，采取监督学习如BP算法等方式优化调整数据驱动模型的参数，从而有效地解决了基于数据驱动构造经验模型不具有理论解释性的缺陷，让模型既具有较好的预测能力，又具有一定的理论基础。

该耦合体系很好地继承了经典力学历程中存在的物理内涵，使得针对管道剩余强度评估的方法遵从一般的物理法则，同时借助数据驱动技术充分发挥检测数据的隐含信息，大幅度增加了评估手段的普适性，在应用过程中，实现“基于数据来指导理论，然后又从理论中反向补充数据”，不断完善评估过程，增强评估的精度及可信度。

4 理论适用性的关键影响因素分析

4.1 缺陷形态的理论适配性

不同评价理论对缺陷形态的适配性存在显著差异：

斑点腐蚀及坑蚀：斑点腐蚀与坑蚀现象评估过程中应考虑缺陷组之间应力叠加的影响，因斑点腐蚀或坑蚀组中各缺陷在缺陷组中将相互产生一定作用，使缺陷周围应力得以升高，因此在腐蚀组应力评定中应考虑缺陷组中的各缺陷应力计算采用有限元方法进行应力计算求得精确的数值；或者采用经过修正的考虑相互作用理论。

裂纹缺陷：裂纹缺陷的缺陷评价中需要利用断裂力学理论，如断裂力学应力强度因子的计算方法，应力强度因子表征了裂纹尖端的应力场强度，它直接决定了裂纹的开裂与否以及开裂速度，而一些简单理论，由于并未考虑裂纹本身在压力和环境因素作用下的扩展机制，无法确定裂纹的发展规律，使得裂纹缺陷评估失效。在实际的工程应用中，必须基于严格的断裂力学理论，充分考虑各种影响因素，才能够实现裂纹缺陷的合理评价。

4.2 材料特性的理论敏感性

材料的屈服强度、断裂韧性、应变硬化指数等参

数对不同理论的敏感性不同：

根据有限元理论，材料的非线性本构关系必须高度精确地描述受力过程应力—应变关系的非线性，这对描述管道力学性能来说，对材料的相关参数，如弹性模量、屈服强度、硬化参数等的测试精度要求非常高，不然误差将严重影响模拟结果的精度。

可靠性理论更多地考虑是材料参数的不确定性分布，它承认实际工程中的材料参数不是固定的单个值，而是有一定变化幅度，在考虑这种不确定性的同时用概率统计法，即确定参数的算术平均值、标准方差、概率分布类型（正态分布、对数正态分布等），用这些参数来估计材料在不同工况条件下的失效率（失效概率），和有限元理论在材料参数方面的观点有着本质的差异。

4.3 载荷工况的理论复杂性

实际运行中的管道承受内压、温度变化、土壤位移等多载荷耦合作用：

有限元法是有效进行多工况载荷组合的计算软件，能较精确地模拟多工况组合载荷下管道系统的应力响应情况。但目前它在实际的应用过程中存在缺乏载荷组合理论标准这一缺陷，即缺乏一个公认的、科学精准的载荷组合标准，因此不同的学者或技术人员可能会采用不同的载荷组合方法，导致评估结果不确定性和评估标准的不统一。

5 研究结论

数字化制造、大数据智能技术的进步为传统的力学理论增添了时效性、智能化的新观点，基于对实时数据的响应及模型的更新，使得剩余强度评定突破了传统评估方式静态的思路，向着全生命周期理论建模稳步推进，可以为管道服役期间实时反馈更准确、更及时的评定结论。

参考文献：

- [1] 帅健, 张春娥, 陈福来. 腐蚀管道剩余强度评价方法的对比研究 [J]. 天然气工业, 2006,26(11):122-125.
- [2] 刘斌, 王树立, 魏新利. 基于有限元的腐蚀管道剩余强度评估 [J]. 油气储运, 2012,31(9):661-664.
- [3] 张华, 张鹏, 谢开明. 腐蚀天然气管道剩余强度的模糊可靠性分析 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2011,13(1):79-82.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市燃气管道老化评估工作指南 [Z].2023.
- [5] 李岩, 赵新伟, 罗金恒. 数字孪生驱动的燃气管道剩余强度评估方法及系统: 中国, CN202410245200.X[P].2024.