

多相流冲蚀对化工管道内衬损伤评估

杨建彪(神华工程技术有限公司安徽分公司,安徽 合肥 230000)

摘要:在多相流体持续冲击下,化工管道内衬极易产生损伤,其演化过程直接影响服役周期与运行安全。多相流冲蚀涵盖固-液、气-液、固-气三种模式,并伴随湍流作用、颗粒冲击及化学腐蚀共同作用,使劣化机制具备非线性和复杂耦合特性。本文从流体动力机制、材料响应机理、损伤预测途径和防护技术四方面展开评估。结果表明,流场形态、颗粒含量与冲击角度是速率控制因素,而材料硬度、延展性和界面强度决定损伤累积与演进。随着数值模拟和数字化监测方法的发展,内衬损伤可在早期实现多维识别,为寿命评估与风险管理提供依据。笔者认为,应将该现象视作流体、材料与结构的综合问题,通过多尺度模拟及跨领域融合构建精细化框架,以确保化工管道长期稳定服役。

关键词:多相流冲蚀;化工管道;内衬损伤;材料响应;寿命评估

中图分类号:TQ055.81 文献标识码:A 文章编号:1674-5167(2025)032-0130-03

Evaluation of chemical pipeline lining damage by multiphase flow erosion

Yang Jianbiao(Shenhua Engineering Technology Co. Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: Under the continuous impact of multiphase fluids, the linings of chemical pipelines are highly susceptible to damage, and their evolution directly affects the service life and operational safety. Multiphase flow erosion involves three action modes—solid–liquid, gas–liquid, and solid–gas—and is further coupled with turbulence, particle impact, and chemical corrosion, giving the deterioration mechanism nonlinear and complex coupled characteristics. This paper evaluates the issue from four perspectives: fluid dynamic mechanisms, material response behavior, damage prediction approaches, and protective technologies. The results indicate that flow field patterns, particle concentration, and impact angle are key factors controlling the erosion rate, while material hardness, ductility, and interfacial strength determine the accumulation and progression of damage. With the advancement of numerical simulation and digital monitoring methods, lining damage can be identified at an early stage in multiple dimensions, providing a reliable basis for life assessment and risk management. The author argues that this phenomenon should be regarded as a comprehensive problem of fluid dynamics, materials science, and structural mechanics, and that a refined evaluation framework should be established through multiscale modeling and interdisciplinary integration to ensure the long-term stable operation of chemical pipelines.

Keywords: multiphase flow erosion; chemical pipeline; lining damage; material response; life assessment

在能源与化工系统的物料输送网络中,管道承担多组分介质的远程传递,其内衬是抑制磨损与腐蚀的关键功能层。证据显示,多相流工况下内衬对冲蚀高度敏感;颗粒一流体相互作用与化学反应叠加,推动劣化沿非线性、多尺度路径演变,局部时空响应尤为强烈,在复杂边界与变径部位尤为显著,并体现出颗粒富集与冲击热点迁移。此类失效既影响设备的服役安全,也对装置稳定运行构成隐忧。当前研究仍偏重试验观测与经验模型,对跨尺度机理、耦合变量识别及工程化评价路径的系统构建不足。针对这些短板,本文围绕冲蚀机理、材料响应、损伤预测与防护优化四个方面开展结构化研究,引入物理约束模型与数据驱动融合策略,旨在服务寿命评估与风险管理,为化工管道长期安全与稳定运行提供可复用的理论与规范与工程支撑。

1 多相流冲蚀机理与动力学特征

1.1 多相流场结构与湍流冲击特征

在化工管道中,多相流场的形成源于气、液、固

三相介质的共同作用,其流态演化表现出高度复杂性。高速液相在管壁附近产生强烈剪切力,而气泡与颗粒的进入进一步引起流体密度与黏度的时空波动,使得涡流与再循环区域频繁发生。此类不均匀流动特征导致局部区域瞬时压力差显著,湍流能量不断向管壁传递并引发脉动冲击。涡流脱落与再附着过程叠加剪切作用,使内衬表面持续承受微观扰动^[1]。在高速运行条件下,弯头、三通及收缩段因速度梯度骤变,局部动能集中作用于材料表面,该类位置成为冲蚀损伤的优先富集区。

1.2 固体颗粒碰撞路径与冲蚀角度作用规律

固体颗粒在流体中受惯性、浮力与流场涡旋的共同影响,其运动轨迹往往呈现复杂曲线与随机分布。切向角度的颗粒碰撞主要导致犁削与切削效应,使内衬表层逐步减薄;垂直角度的冲击则常引发塑性变形和表面剥离,局部坑蚀范围不断扩大。研究显示,颗粒粒径与硬度越高,冲击能量越大,对内衬损伤的累积效应愈加显著。

当颗粒浓度增加时，粒子间相互碰撞与再分布进一步强化了冲蚀不均，典型特征表现为条带状或斑块状磨损形貌。特别是在管道弯曲段与变径段，复杂流态促使颗粒形成多角度交织碰撞区，呈现交错沟槽与剥蚀坑洼。结果可知，颗粒路径与角度的多样性揭示了冲蚀加速的非线性本质。

1.3 流体腐蚀与机械磨损的耦合效应

在化工介质环境中，多相流过程既包含固体颗粒的机械冲刷，又叠加酸碱及盐类溶液的化学腐蚀作用。机械冲击首先破坏材料表面的钝化膜，使保护层失去稳定性，从而为后续腐蚀反应提供了入侵通道。例如，腐蚀类型包括应力腐蚀、局部腐蚀、大气腐蚀与均匀腐蚀，其发生程度受材料成分及环境条件共同控制，腐蚀行为随环境波动表现出高度不确定性，单一预测模型存在局限^[2]。

化学反应生成的腐蚀产物进一步改变了表面微结构，使其在颗粒持续冲击下更易剥落，促使损伤速度显著提升。结果是，材料表层同时呈现腐蚀坑与切削沟槽的叠加特征，并逐渐演化为深层剥蚀。液相中的溶解氧与氯离子等活性成分，还可能在裂纹尖端诱发应力腐蚀扩展，显著削弱内衬承载力。微观尺度上，腐蚀作用降低了晶界化学稳定性，使微裂纹更易连通；宏观尺度上，则表现为失效速率加快与寿命缩短。

2 内衬材料响应与损伤演化规律

2.1 材料硬度、韧性与延展性的综合影响

在化工管道的服役过程中，内衬材料的硬度、韧性与延展性始终被认为是决定其抗冲蚀性能的核心指标。硬度提升能够在颗粒冲击时有效减弱切削痕迹的产生，但过度增强硬度常会伴随脆性上升，使其在高能冲击载荷下更易发生碎裂破坏。韧性与延展性则主导了材料对冲击能量的吸收与应力的再分配，当具备充分延展性时，塑性变形可延缓裂纹的起始与发展。在多相流冲刷的不稳定环境中，若硬度不足，磨损进程会显著加快；若延展性偏低，则更倾向于发生脆性断裂。

研究结论表明，保持硬度与韧性之间的动态均衡对提升抗冲蚀能力具有关键意义^[3]。在工程实践中，往往采用复合化路径实现这一目标，例如在表层引入高硬度相以抵御颗粒冲击，而在基体保持一定韧性以分担载荷并推迟疲劳裂纹的扩展，由此为复合结构设计提供了切实依据。

2.2 界面结合强度与分层剥离机制

化工管道内衬多采用复合材料或涂层形式，其与基体之间的界面结合强度直接决定服役稳定性。当流体颗粒在高频冲击作用下反复加载时，界面区域承受

剪切与拉伸交替应力，若结合不足，分层与局部剥离现象更易发生。

该过程通常表现为三个阶段：起始阶段，微观孔隙或杂质处出现局部应力集中；随后阶段，颗粒持续撞击引发界面疲劳，逐渐形成细微裂纹；扩展阶段，裂纹贯通导致局部区域发生层状剥落；另外，内衬完整性丧失，基体直接暴露，损伤加速蔓延。研究指出，提升界面结合强度是延缓分层剥离的有效路径，可通过优化过渡层设计、改进表面粗糙度处理工艺以及采用等离子喷涂或化学键合等手段实现。

2.3 微裂纹萌生、扩展与表面疲劳过程

在多相流冲蚀环境中，微裂纹的萌生与扩展是材料劣化的核心环节。颗粒高速冲击会在表层形成局部塑性变形区，位错堆积逐步诱导裂纹起始。当冲击反复作用时，微裂纹在表面呈现交错扩展，其在循环载荷下表现出宏观扩展趋势。随裂纹加深，材料表层承载能力下降，疲劳损伤特征逐步累积，表现为剥落与碎屑脱落，导致内衬保护功能丧失^[4]。在此过程中，微观组织特征如晶界分布、第二相颗粒尺寸与分布规律，对裂纹萌生速率与扩展路径具有决定作用。

3 损伤预测方法与寿命评估模型

3.1 经验模型与理论公式的适用性分析

化工管道服役分析中，经验模型与理论公式依然广泛被采用于损伤预测的初步环节。经验模型多依赖长期运行过程中积累的监测数据与工程操作经验，利用统计或回归途径对冲蚀速率进行近似求解，其优势在于简便可行、参数获取成本低，因而在工程现场的快速评估中应用较多。但这类模型往往假定流场状态及颗粒分布均匀化，难以呈现多相流中瞬态旋涡、局部能量富集的实际机理，已有研究证明其预测结果在复杂工况下与实际测试存在明显差异。理论公式则基于流体与材料力学的基本原理，将冲击能量与磨损深度建立量化联系，或通过函数关系揭示颗粒浓度与损伤速率的耦合规律^[5]。

3.2 损伤监测数据驱动的寿命预测框架

随着传感技术与智能算法的迭代，依托在役监测数据开展寿命预测已成为重要研究焦点。在管道服役过程中，于关键部位布设光纤传感器、声发射系统和压力感应装置，可连续追踪应力变化、声学反馈及温度扰动，这些观测量常被认为是损伤演化的先兆信号。借助机器学习方法，对长期积累的大规模数据进行模式挖掘，能够识别出隐含的劣化演进路径。该类预测框架还可与数值仿真耦合，形成“机理驱动+数据学习”的复合体系，在保证物理解释性的同时，增强预测的动态适应能力与灵活度。

4 工程防护措施与优化策略

4.1 耐蚀耐磨复合材料的开发与应用方向

在化工管道服役的全周期内，内衬材料必须同时具备抵抗颗粒冲击与化学介质侵蚀的能力。研究经验表明，单一性能材料在复杂环境中常表现出不足。复合体系的引入为减缓冲蚀提供了有效途径，其核心思想是把高硬度陶瓷相与高韧性金属基体结合，实现大切削与能量吸收的平衡优势^[6]。树脂基复合材料通过纤维增强机制，不仅能提升断裂韧性，还能在腐蚀环境下保持稳定性能。在前沿探索中，纳米复合体系已成为热点方向，纳米填料的掺入能够在界面生成致密屏障，抑制腐蚀介质扩散并增强抗疲劳特征。在实际工程应用中，还应关注其与管道基体的协调性，特别是热膨胀系数和界面粘结强度的匹配，否则将带来二次劣化隐患。

4.2 流场优化与结构改进的减损设计路径

在化工管道的防护设计中，除材料改性措施外，结构与流场的优化同样是不可忽视的部分。相关研究表明，弯头、三通以及缩径段是冲蚀问题的高发区域，其主要原因是流速急剧变化与颗粒堆积效应。通过流场的科学调节，可有效减弱局部能量集中的作用，从而延缓损伤形成。实践手段包括在弯头设置导流组件或采用大半径过渡，使颗粒流动更为平滑以减少冲击；在三通段增设分流结构，引导颗粒流体的均匀分布，从而降低局部冲蚀风险；在管壁应用螺旋衬层或波纹结构，以改变颗粒路径，减小入射角度并削弱切削效应^[7]。

4.3 智能化涂层与自修复技术的前景探索

随着材料科学、表面工程以及纳米技术的持续进步，智能化涂层与自修复技术正在逐步成为化工管道防护领域的重要研究方向。传统涂层在长期运行中经受颗粒冲刷和介质腐蚀后，往往在局部区域出现微裂纹或磨损点，一旦失去完整性，防护性能会迅速下降，甚至引发失效。而智能化涂层的设计理念在于赋予材料“自我修复”或“环境响应”功能，使其能够在服役过程中动态调整性能。典型的自修复涂层通过在涂层基体中分散微胶囊、纳米容器或中空纤维，当外界冲击导致表面出现裂缝时，这些载体结构被破坏并释放出修复剂，与周围的催化组分或环境介质反应，生成致密的固化物质，从而快速封闭缺陷。

在化工管道环境中，自修复涂层不仅对局部裂纹具有愈合作用，还能有效阻断酸碱、盐类离子等腐蚀性介质的进一步渗透，减少腐蚀疲劳和层间剥离的发生概率。与此同时，智能涂层的研究也在向响应式功能拓展，例如在温度急剧升高时，涂层能够通过相变

材料释放潜热，降低局部应力集中；在 pH 值异常波动时，涂层内部的化学官能团可发生离子交换反应，形成新的屏障层，提高抗渗透性能^[7]。更具前瞻性的方向是将传感功能与涂层结构相结合，使涂层不仅具备防护与修复作用，还能通过电阻、光学或声学信号反馈其健康状态，实现在线监测。未来的智能涂层可能呈现“防护—感知—修复”一体化的功能闭环，使化工管道具备自适应与自诊断能力。

5 结语

多相流冲蚀对化工管道内衬损伤的作用机理，实质上是流体动力学、材料学与结构设计耦合效应的综合体现。研究显示，流场湍动、颗粒浓度及冲击角度决定了冲蚀速率，而硬度、延展性与界面结合性能主导了损伤的累积与扩展过程。随着服役时间延长，微裂纹萌生与扩展削弱了整体结构稳定性，并表现为剥离与层间脱落的典型失效模式。方法层面，经验模型在早期应用中具有参考意义，但其预测精度在复杂多相流环境下存在局限。

近年来，多尺度建模、数值模拟以及人工智能驱动的寿命预测逐步发展，在揭示损伤演化规律与提升评估精度方面展现出优势，并结合实时监测技术，实现了对服役周期的动态化管理。在防护路径上，耐磨复合材料、流场优化与智能化涂层等措施已为减缓冲蚀提供多维支撑。展望未来，研究应强调跨学科融合，结合计算流体力学、材料微结构解析与智能监测平台，建立动态适应性评估体系。该体系有望实现早期识别与快速干预，延长管道寿命并降低运行风险，为化工行业的长期安全运行提供参考。

参考文献：

- [1] 偶国富, 龚宝龙, 李伟正, 等. 煤液化多相流输送管道冲蚀磨损分布预测及分析 [J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(05):247-251.
- [2] 滕炼, 孙首群, 焦玉格. 石油化工管道弯头冲蚀磨损数值模拟 [J]. 软件导刊, 2021, 20(01):41-45.
- [3] 孟冠儒. 影响石油化工管道设计的因素及解决措施分析 [J]. 工程建设与设计, 2017(04):63-64.
- [4] 石守稳, 孙兴悦, 刘争, 等. 化工管道运输技术发展现状与展望 [J]. 前瞻科技, 2024, 3(02):94-101.
- [5] 李家雄. 化工特种设备系统流动腐蚀失效分析及防控技术研究 [J]. 石化技术, 2023, 30(02):264-266.
- [6] 余杰. 探析石油化工中管道设计应注意的事项 [J]. 化工管理, 2018(05):30+32.
- [7] 莫颖岚. 化工工艺管道安装注意事项及材质的选择 [J]. 橡塑技术与装备, 2015, 41(18):18-19.