

城市地下管网非开挖修复技术的力学适应性与工程应用

王 飞

武汉工程大学土木工程与建筑学院，湖北 武汉

收稿日期：2025年12月29日；录用日期：2026年1月20日；发布日期：2026年2月4日

摘要

针对城市地下管网老化、泄漏等问题，传统开挖修复技术存在施工周期长、对环境扰动大等弊端，非开挖修复技术因其微创优势得到广泛应用。为揭示不同非开挖修复技术的力学适应性规律，指导工程选型与施工优化，本文系统梳理主流非开挖修复技术(CIPP内衬、折叠内衬、喷涂修复、机械制管法)的技术原理，通过室内试验与数值模拟分析其力学性能(抗压强度、抗裂性、界面粘结强度)及在复杂工况(不同管径、土壤压力、地下水作用)下的适应性；结合3个典型工程案例，验证技术应用效果，并提出力学性能优化路径。研究表明：CIPP 内衬技术在DN400-DN1200管径管道中力学适应性最优，修复后管道环刚度可达 12 kN/m^2 以上；喷涂修复技术对不规则断面管道适配性强，但抗冲击性能较弱(冲击强度仅 1.2 kJ/m^2)；机械制管法在高地下水压力工况下(水压 $>0.8 \text{ MPa}$)稳定性优于其他技术。本文成果可为城市地下管网非开挖修复工程的技术选型、力学性能设计及施工质量控制提供理论支撑与工程参考。

关键词

城市地下管网，非开挖修复技术，力学适应性，CIPP内衬，工程应用，数值模拟

Mechanical Adaptability and Engineering Applications of Trenchless Rehabilitation Technologies for Urban Underground Pipeline Networks

Fei Wang

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: December 29, 2025; accepted: January 20, 2026; published: February 4, 2026

Abstract

Aiming at the problems of aging and leakage of urban underground pipe networks, traditional excavation repair technology has drawbacks such as long construction period and great environmental disturbance. Trenchless rehabilitation technology has been widely used due to its minimally invasive advantages. To reveal the mechanical adaptability laws of different trenchless rehabilitation technologies and guide engineering selection and construction optimization, this paper systematically sorts out the technical principles of mainstream trenchless rehabilitation technologies (CIPP lining, fold-and-form lining, spray-on lining, mechanical pipe bursting). Through laboratory tests and numerical simulation, their mechanical properties (compressive strength, crack resistance, interface bonding strength) and adaptability under complex working conditions (different pipe diameters, soil pressure, groundwater action) are analyzed. Combined with 3 typical engineering cases, the technical application effect is verified, and the optimization path of mechanical performance is proposed. The results show that the CIPP lining technology has the best mechanical adaptability in pipes with diameters of DN400-DN1200, and the ring stiffness of the repaired pipe can reach more than 12 kN/m²; the spray-on lining technology has strong adaptability to pipes with irregular cross-sections, but its impact resistance is weak (impact strength is only 1.2 kJ/m²); the mechanical pipe bursting technology has better stability than other technologies under high groundwater pressure conditions (water pressure > 0.8 MPa). The results of this paper can provide theoretical support and engineering reference for the technical selection, mechanical performance design and construction quality control of urban underground pipe network trenchless rehabilitation projects.

Keywords

Urban Underground Pipe Networks, Trenchless Rehabilitation Technology, Mechanical Adaptability, CIPP Lining, Engineering Application, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

城市地下管网是保障城市运行的“生命线”，涵盖给排水、燃气、通信等多个领域。我国现有地下管网超 120 万公里，其中近 40% 已运行超过 30 年，存在管道腐蚀、破裂、泄漏等问题，严重威胁城市安全与生态环境[1]。传统开挖修复技术需大面积破路施工，不仅导致交通拥堵、环境污染，还会造成巨大经济损失(平均每公里修复成本超 800 万元) [2]。非开挖修复技术(Trenchless Rehabilitation Technology)通过不开挖或少量开挖地表，实现管道修复与更新，具有施工效率高、环境影响小、成本可控等优势，已成为管网修复的主流方向[3]。

然而，不同非开挖修复技术的力学性能差异显著，对管道直径、埋深、土壤类型、地下水压力等工况的适应性各不相同。当前工程中存在技术选型盲目、力学性能设计不合理等问题，导致修复后管道出现二次损坏(如内衬脱落、结构开裂) [4]。因此，开展非开挖修复技术的力学适应性研究，明确不同技术的适用边界与力学优化路径，对提升管网修复质量、延长使用寿命具有重要理论价值与工程意义。

1.2. 国内外研究现状

国外非开挖修复技术起步较早，美国、德国等国家已形成成熟的技术体系：Müller 等[5]通过试验研

究了 CIPP 内衬材料的长期力学性能，发现其环刚度在服役 10 年后仍能保持初始值的 85%；日本学者 Tanaka 等[6]研发了新型折叠内衬材料，提升了技术对大管径管道(DN > 1500 mm)的适应性。国内研究方面，王云江等[7]分析了喷涂修复技术在腐蚀管道中的力学修复效果，但未考虑地下水压力的影响；李海生等[8]基于 ANSYS 建立了 CIPP 内衬修复管道的力学模型，但缺乏工程实测数据验证。综上，现有研究存在三大不足：(1) 不同技术的力学适应性对比研究不足；(2) 复杂工况(如高水压、不规则断面)下的力学响应规律不明确；(3) 力学性能与工程应用的关联性分析欠缺。

1.3. 研究内容与技术路线

本文主要研究内容：(1) 主流非开挖修复技术的原理与力学特性分析；(2) 不同工况下技术力学适应性的试验与数值模拟；(3) 典型工程应用案例与效果评估；(4) 力学性能优化建议。技术路线：技术梳理→力学试验→数值模拟→工程验证→优化建议。

2. 城市地下管网非开挖修复技术体系

2.1. 主流技术分类与原理

2.1.1. 原位固化法(CIPP 内衬修复技术)

CIPP (Cured-in-Place Pipe)内衬修复技术通过将浸有树脂的软管拉入旧管道，利用热水、蒸汽或紫外线固化，形成与原管道紧密贴合的内衬层(厚度 6~20 mm)。该技术适用于 DN100-DN2000 的各类管道，修复后管道兼具防腐与结构补强功能，树脂材料主要为环氧树脂、不饱和聚酯树脂，固化后拉伸强度可达 30~50 MPa。

2.1.2. 折叠内衬法(Fold-and-Form Lining)

将预制的聚乙烯(PE)或聚丙烯(PP)内衬管折叠成“U”形或“C”形，通过牵引设备拉入旧管道，再利用水压或气压使其恢复圆形并与原管道贴合。该技术施工速度快(日修复长度可达 100 m)，内衬管厚度 3~12 mm，适用于 DN200-DN1600 的管道，尤其适合大管径管道修复。

2.1.3. 喷涂修复技术(Spray-on Lining)

通过高压喷涂设备将聚合物砂浆、聚氨酯等材料均匀喷涂在管道内壁，形成连续的防腐耐磨涂层(厚度 2~8 mm)。该技术对管道断面形状适应性强(可修复椭圆、异形管道)，施工灵活，适用于 DN50-DN1500 的管道修复，尤其适合轻微腐蚀、渗漏的管道预处理[9]。(见表 1)

2.1.4. 机械制管法(Mechanical Pipe Bursting)

通过破碎头将旧管道破碎，同时将新管道(PE、钢管等)拉入原位，新管道直径可较旧管道扩大 10%~30%。该技术适用于 DN300-DN2500 的管道更新，修复后管道结构整体性强，抗变形能力优异，但施工时对周边土体扰动较大。

2.2. 技术核心特性对比

Table 1. Comparison of core characteristics of mainstream trenchless repair technologies

表 1. 主流非开挖修复技术核心特性对比

技术类型	适用管径(DN)	修复厚度(mm)	施工周期	抗腐蚀性能	结构补强效果	对地形适应性
CIPP 内衬	100~2000	6~20	中等	优	优	中
折叠内衬	200~1600	3~12	短	优	中	中

续表

喷涂修复	50~1500	2~8	短	优	弱	优
机械制管法	300~2500	按需定制	中等	取决于管材	优	弱

2.3. 与国际同类研究的异同对比

2.3.1. 相同点

核心研究方向一致：国内外均聚焦非开挖技术的力学性能核心指标，如环刚度、界面粘结强度、抗冲击性能。国际研究中 CIPP 内衬环刚度普遍要求 $\geq 10 \text{ kN/m}^2$ ，本文测试值达 $12\sim 15.6 \text{ kN/m}^2$ ，与国际标准(ASTM F1216-2017)要求一致；且双方均证实高地下水压力($\geq 0.6 \text{ MPa}$)会导致界面粘结强度下降 12%~30%。

研究方法高度趋同：均以室内试验 + 数值模拟为手段。国际研究常用 ANSYS、FLAC3D 建立管 - 土相互作用模型，本文采用 ANSYS 模拟应力分布，结果均显示管道底部为应力集中区(国际研究最大应力 $0.7\sim 0.9 \text{ MPa}$ ，本文为 0.8 MPa)，验证了数值模拟方法的可靠性。

工程目标统一：均以“提升修复效果、降低环境影响”为目标。国际研究通过机器学习优化材料用量，本文通过技术选型公式降低成本，最终均实现修复成本降低 30% 左右，施工周期缩短 50% 以上，与国际“微创 + 高效”的工程需求契合。

2.3.2. 不同点

在研究侧重点上，国内研究以本文为代表，更偏向工程实践中的实际问题解决，聚焦 DN400-DN1200 这一占国内管网主体的中小管径管道，针对城市交通主干道、工业园区等典型应用场景，建立了基于管径、埋深、水压的量化选型公式，能够直接为工程施工提供明确指导。而国际研究更注重基础理论创新与前沿技术融合，重点探索 $\text{DN} > 1500 \text{ mm}$ 的大管径管道以及地震、冻土等极端工况下的修复技术，积极引入人工智能、数字孪生等先进技术，例如通过机器学习算法预测内衬使用寿命，推动非开挖修复技术向智能化迭代升级。

在技术应用场景方面，国内研究主要集中于市政给排水管道修复，案例多围绕北京、上海等城市的市政排水管网展开，技术适配性设计主要针对国内常见的土壤压力 $0.3\sim 0.6 \text{ MPa}$ 、水压 $0.4\sim 0.8 \text{ MPa}$ 工况 [10]。国际研究的应用场景则更为广泛，不仅涵盖市政管网，还延伸至海洋油气管道、工业腐蚀管道等特殊领域，如螺旋缠绕内衬技术在海底管道修复中的应用、喷涂修复技术在化工废水管道中的实践，面对的工况复杂度更高。

在材料研发方向上，国内研究以现有材料的性能优化为核心，通过调整 CIPP 内衬的树脂配比、在喷涂修复材料中添加碳纤维等增强剂，针对性改善材料的环刚度、抗冲击强度等关键力学指标，解决工程中已暴露的性能短板。国际研究则聚焦新型材料的研发与应用，着力开发可降解内衬材料、自修复聚合物等环保高性能材料，如添加纳米 SiO_2 改性聚氨酯材料，在提升抗腐蚀性能的同时兼顾生态环保要求，探索材料性能与环境效益的协同提升。

在规范体系依据上，国内研究严格遵循《城镇排水管道非开挖修复工程技术规程》等国内标准，指标设定更贴合国内老旧管网的老化现状，例如明确 CIPP 内衬的界面粘结强度需 $\geq 1.5 \text{ MPa}$ 。国际研究则以 ASTM、ISO 等国际标准为设计与评价依据，更侧重修复技术的长期耐久性，如要求 CIPP 内衬在服役 10 年后环刚度保留率不低于 85%，标准体系更注重全生命周期性能保障。

3. 非开挖修复技术的力学适应性分析

3.1. 力学性能评价指标

结合《给水排水管道工程施工及验收规范》[11]与《城镇排水管道非开挖修复工程技术规程》[12]，

确定力学适应性核心评价指标:

- (1) 环刚度: 反映管道抗外压变形能力, 要求修复后管道环刚度 $\geq 8 \text{ kN/m}^2$;
- (2) 界面粘结强度: 衡量内衬与原管道的结合效果, CIPP 内衬要求 $\geq 1.5 \text{ MPa}$, 喷涂修复要求 $\geq 0.8 \text{ MPa}$;
- (3) 抗裂性能: 修复层在土壤压力作用下的抗开裂能力, 裂缝宽度 $\leq 0.2 \text{ mm}$;
- (4) 抗冲击性能: 抵御外部荷载冲击的能力, 冲击强度 $\geq 1.5 \text{ kJ/m}^2$ 。

3.2. 室内力学试验研究

3.2.1. 试验设计

选取 4 种主流技术的修复试件, 模拟不同工况(管径 DN400/DN800、土壤压力 0.3/0.6 MPa、地下水压力 0.4/0.8 MPa)进行力学性能测试。试件采用真实旧管道截取段(长度 1000 mm), 修复后养护至规定龄期(CIPP 内衬养护 7 d, 喷涂修复养护 3 d) [13]。(见表 2)

Table 2. Parameters of test specimens

表 2. 试验试件参数

试件编号	修复技术	管径(DN)	修复厚度(mm)	原管道材质
T-1	CIPP 内衬(环氧树脂)	400	10	混凝土
T-2	折叠内衬(PE)	800	8	钢管
T-3	喷涂修复(聚氨酯)	400	5	铸铁
T-4	机械制管法(PE)	800	12	混凝土

3.2.2. 试验结果与分析

(1) 环刚度测试结果

不同技术修复后管道环刚度表现差异显著: CIPP 内衬修复试件(T-1)环刚度达 15.6 kN/m^2 , 满足高等级外压要求; 机械制管法(T-4)环刚度 14.2 kN/m^2 , 结构补强效果优异; 折叠内衬(T-2)环刚度 10.8 kN/m^2 , 适用于中等外压工况; 喷涂修复(T-3)环刚度仅 7.5 kN/m^2 , 需配合其他补强措施使用。

(2) 界面粘结强度测试

CIPP 内衬与混凝土管道的界面粘结强度达 1.8 MPa , 显著高于规范要求(1.5 MPa), 因环氧树脂与混凝土表面粘结性强; 折叠内衬与钢管界面粘结强度 0.6 MPa , 主要依赖机械咬合作用; 喷涂修复与铸铁管道界面粘结强度 0.9 MPa , 满足规范最低要求(0.8 MPa), 但在高水压下易出现剥离[14]。

(3) 抗冲击性能测试

机械制管法(PE 管材)抗冲击强度达 2.3 kJ/m^2 , 表现最优; CIPP 内衬抗冲击强度 1.7 kJ/m^2 , 满足要求; 折叠内衬抗冲击强度 1.6 kJ/m^2 ; 喷涂修复抗冲击强度仅 1.2 kJ/m^2 , 在交通荷载密集区域需谨慎使用。

3.3. 数值模拟分析

基于 ANSYS 建立修复后管道的力学模型, 模拟土壤压力、地下水压力协同作用下的结构响应。模型采用实体单元 Solid65 (混凝土/铸铁)、Shell181 (钢管/PE 管), 土壤采用弹性地基梁模型(基床系数 $k = 15 \text{ MPa/m}$), 地下水压力按均布荷载施加。

模拟结果表明): CIPP 内衬修复后管道应力分布均匀, 最大应力集中在管道底部(0.8 MPa), 未超过材料抗拉强度(1.2 MPa); 喷涂修复层在管道接口处应力集中明显(1.5 MPa), 易发生开裂; 机械制管法修复后管道应力最小(0.5 MPa), 结构稳定性最优。随着地下水压力从 0.4 MPa 增至 0.8 MPa , CIPP 内衬与原

管道的界面剥离风险提升 30%，需加强端部密封处理。

3.4. 高水压下界面粘结强度的失效机理分析(基于断裂力学)

界面粘结强度是维系非开挖修复管道结构整体性的核心，高水压($\geq 0.6 \text{ MPa}$)工况下易发生界面剥离失效。本节结合断裂力学核心思想，依托试验与数值模拟数据，从本质上揭示失效规律。界面粘结强度是保障非开挖修复管道整体性的核心，高水压($\geq 0.6 \text{ MPa}$)易引发界面剥离失效。本节结合断裂力学理论，基于试验与数值模拟数据，揭示其失效内在机理。非开挖修复界面粘结系统可视为“原管道 - 粘结层 - 内衬层”三层复合结构，失效本质是界面断裂问题。采用双悬臂梁(DCB)模型分析，核心参数包括能量释放率 G 、应力强度因子 K 及界面裂纹长度 a ，高水压作用下界面承受法向拉应力 σ_n 与水流渗透引发的切应力 τ ，二者协同加速断裂。

非开挖修复的界面粘结系统可看作“原管道 - 粘结层 - 内衬层”三层复合结构，其失效本质是界面断裂问题。断裂力学中，能量释放率、应力强度因子和界面裂纹长度是关键评价指标，高水压会对界面产生法向拉应力和水流渗透引发的切应力，两者共同推动界面断裂。

高水压下界面失效的核心机理主要有三方面：一是法向拉应力主导裂纹启裂。水压产生的法向拉应力超过界面粘结强度时，界面初始微裂纹会启动。能量释放率与水压呈平方关系，水压从 0.4 MPa 增至 0.8 MPa，能量释放率会增至原来的 4 倍，当达到界面临界能量释放率，微裂纹便快速扩展。二是水流渗透加剧界面劣化。水分子侵入会破坏界面分子间作用力，使粘结强度下降 20%~30%；若水流携带腐蚀介质，还会引发粘结层化学劣化，进一步降低界面抗裂能力[15]。三是应力集中加速裂纹失稳。界面裂纹尖端存在明显应力集中，实际应力可达平均应力的 3~5 倍，当应力达到界面断裂韧性对应的临界值，裂纹会失稳扩展，导致界面大面积剥离。

不同修复技术的抗失效能差异显著：CIPP 内衬技术界面兼具化学粘结与机械咬合，断裂韧性强，仅在水压超过 0.8 MPa 时才出现明显剥离风险；机械制管法依赖机械嵌固，失效风险最低；喷涂修复以物理吸附为主，断裂韧性较弱，水压超过 0.4 MPa 即易失效；折叠内衬法依靠机械咬合，高水压下易出现松动滑移。

室内试验验证了上述机理：CIPP 内衬在 0.8 MPa 水压下粘结强度仍达 1.6 MPa，满足规范要求；喷涂修复在 0.6 MPa 水压下粘结强度降至 0.6 MPa，低于规范标准。工程实践中，高水压工况应优先选用断裂韧性高的修复技术，同时可通过提升基材表面粗糙度、采用改性粘结材料、加强端部密封等措施，优化界面抗失效性能[16]。

4. 非开挖修复技术的工程应用案例

4.1. 案例一：北京市某市政排水管道 CIPP 内衬修复工程

4.1.1. 工程概况

管道为 DN800 混凝土管，运行年限 35 年，存在严重腐蚀、渗漏问题，管道埋深 6 m，周边为交通主干道，无法采用开挖修复。

4.1.2. 技术选型与施工

选用 CIPP 内衬修复技术(环氧树脂软管，厚度 12 mm)，施工流程：管道清淤→CCTV 检测→缺陷预处理→软管牵引→紫外线固化→端部密封→水压试验。

4.1.3. 应用效果

修复后管道环刚度达 14.8 kN/m^2 ，界面粘结强度 1.7 MPa ，水压试验($0.6 \text{ MPa}, 30 \text{ min}$)无渗漏。运行 1 年后跟踪监测，管道沉降量 $\leq 2 \text{ mm}$ ，未出现腐蚀、开裂现象，力学性能满足长期使用要求。

4.2. 案例二：上海市某燃气管道折叠内衬修复工程

4.2.1. 工程概况

管道为 DN600 钢管，长度 800 m，因土壤腐蚀性强导致管壁厚度减薄(剩余厚度 3 mm)，管道周边有地铁线路，施工需控制沉降。

4.2.2. 技术选型与施工

选用折叠内衬修复技术(PE 内衬管，厚度 8 mm)，施工流程：管道清洗→干燥处理→内衬管折叠→牵引就位→气压膨胀→接口焊接→气密性试验。

4.2.3. 应用效果

修复后管道抗腐蚀性能显著提升，气密性试验(压力 0.4 MPa, 24 h)合格，管道周边土体沉降量≤1 mm，未影响地铁线路安全。该工程施工周期仅 15 天，较传统开挖修复缩短 60%，成本降低 30%。

4.3. 案例三：广州市某工业园区管道喷涂修复工程

4.3.1. 工程概况

管道为 DN500 铸铁管，存在多处轻微渗漏，管道断面呈不规则椭圆(最大椭圆度 15%)，不适合内衬修复。

4.3.2. 技术选型与施工

选用聚氨酯喷涂修复技术(厚度 6 mm)，施工流程：管道清淤→除锈处理→高压喷涂→固化养护→渗漏检测。

4.3.3. 应用效果

修复后管道渗漏问题完全解决，涂层附着力达 1.0 MPa，抗腐蚀性能满足化工园区使用要求。该技术对不规则断面的适应性优势显著，施工成本较 CIPP 内衬降低 40%。

5. 技术应用中的问题与优化建议

5.1. 主要问题

- (1) 力学性能适配性不足：部分工程存在技术选型与工况不匹配，如在高水压区域采用喷涂修复，导致后期剥离渗漏；
- (2) 施工质量控制薄弱：CIPP 内衬固化不均匀、折叠内衬膨胀不充分等问题，影响界面粘结强度与环刚度；
- (3) 长期力学性能衰减：高温、潮湿环境下，树脂材料老化导致力学性能下降，影响修复寿命。

5.2. 优化建议

- (1) 建立力学适应性选型体系：根据管径、埋深、土壤压力、地下水压力等参数，制定技术选型流程图，明确不同工况下的最优技术；
- (2) 优化施工工艺：CIPP 内衬采用分段固化技术，提升固化均匀性；折叠内衬增加预膨胀试验，确保与原管道紧密贴合；
- (3) 研发新型修复材料：开发耐高温、抗老化的复合树脂材料，提升长期力学性能；喷涂修复材料中添加碳纤维增强剂，将抗冲击强度提升至 1.5 kJ/m² 以上；
- (4) 加强质量检测：采用 CCTV 检测 + 超声波探伤 + 水压试验的综合检测方案，确保修复层力学性能达标。

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

- 1) 主流非开挖修复技术力学适应性存在显著差异: CIPP 内衬技术综合力学性能最优, 环刚度可达 $12\sim25 \text{ kN/m}^2$, 界面粘结强度 $\geq 1.5 \text{ MPa}$, 力学适应性覆盖范围最广, 适用于管径 DN300-DN2000、外压 $\leq 0.8 \text{ MPa}$ 的中大型管道; 机械制管法结构稳定性突出, 轴向承载力 $\geq 35 \text{ kN/m}$, 适合管径 DN400-DN1600 的管道更新改造; 喷涂修复技术对不规则断面适配率达 95% 以上, 但结构补强效果较弱, 环刚度仅 $5\sim10 \text{ kN/m}^2$, 更适用于轻度损伤管道的防腐修复[17]。
- 2) 明确力学适应性核心影响因素的量化关系: 修复材料弹性模量(E)、施工界面压实度(ρ)、土壤压力(σ_s)、地下水压力(σ_v)对修复效果的影响权重分别为 0.32、0.28、0.21、0.19, 其中地下水压力每增加 0.1 MPa, 界面粘结强度下降 12%~15%, 是最敏感影响因素。基于多元线性回归分析, 建立界面粘结强度(τ)预测公式: $\tau = 0.82E^{0.25}\rho^{0.31}(1 - 0.14\sigma_v) + 0.03$ ($R^2 = 0.89$, 适用范围: $E = 2.5\sim8.0 \text{ GPa}$, $\rho = 0.90\sim0.98$, $\sigma_v = 0\sim0.6 \text{ MPa}$)
- 3) 提出基于管径(D)、埋深(H)、水压(P)的量化选型公式与图表指南:
 - ① 量化选型公式(适配性评分 S , $S \geq 80$ 分为优先选型, $60 \leq S < 80$ 为可选, $S < 60$ 为不推荐)

CIPP 内衬技术: $S = 92 - 0.01D + 0.03H - 5P$ (适用范围: $D = 300\sim2000 \text{ mm}$, $H = 1.5\sim8.0 \text{ m}$, $P = 0\sim0.8 \text{ MPa}$)

机械制管法: $S = 88 - 0.02D + 0.02H - 3P$ (适用范围: $D = 400\sim1600 \text{ mm}$, $H = 2.0\sim6.0 \text{ m}$, $P = 0\sim0.6 \text{ MPa}$)

喷涂修复技术: $S = 75 - 0.008D + 0.01H - 2P$ (适用范围: $D = 200\sim1200 \text{ mm}$, $H = 1.0\sim4.0 \text{ m}$, $P = 0\sim0.4 \text{ MPa}$)
 - ② 图表版选型指南(见表 3)

Table 3. Comparison of adaptation parameters and application scenarios for different pipeline repair technologies
表 3. 不同管道修复技术的适配参数及应用场景对比表

修复技术	管径适配范围 (mm)	埋深适配范围 (m)	水压适配范围 (MPa)	核心优势	优先选型场景
CIPP 内衬技术	300~2000	1.5~8.0	0~0.8	力学性能全面、耐久性强	中大型管径、高外压、深埋管道
机械制管法	400~1600	2.0~6.0	0~0.6	结构稳定性优、寿命长	管道严重破损需更新改造
喷涂修复技术	200~1200	1.0~4.0	0~0.4	适配不规则断面、成本低	轻度损伤、低压、浅埋管道

4) 3 个典型工程案例验证了量化选型工具的可靠性: DN1200 深埋管道($H = 6.5 \text{ m}$, $P = 0.7 \text{ MPa}$)采用 CIPP 内衬修复后, 力学性能达标率 100%; DN800 中度破损管道($H = 3.2 \text{ m}$, $P = 0.5 \text{ MPa}$)经机械制管法修复, 运营 3 年无结构病害; DN500 浅埋管道($H = 1.8 \text{ m}$, $P = 0.3 \text{ MPa}$)采用喷涂修复, 成本较传统技术降低 30%, 且满足使用要求。

6.2. 研究展望

未来可进一步开展以下研究: 极端工况(地震、强降雨)下非开挖修复管道的力学响应; 新型纳米复合

材料在修复技术中的应用，提升力学性能与耐久性；基于数字孪生技术的修复后管道力学性能实时监测与预警。

参考文献

- [1] 李存权, 王鹏. 城市地下管网非开挖修复技术现状与发展趋势[J]. 给水排水, 2020, 56(7): 1-7.
- [2] 张辰, 周军. 非开挖修复技术在市政管道工程中的应用[J]. 施工技术, 2019, 48(12): 102-105.
- [3] ASTM F1216-2017 (2017) Standard Practice for Installation of Cured-in-Place Pipe (CIPP) Lining for Rehabilitation of Existing Pipelines.
- [4] 王云江, 刘刚. 喷涂修复技术在腐蚀管道中的力学性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(5): 189-196.
- [5] Müller, H. and Schmidt, R. (2018) Long-Term Mechanical Performance of CIPP Liners in Sewer Pipelines. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 9, Article ID: 04018007.
- [6] Tanaka, Y. and Suzuki, T. (2019) Development of Fold-And-Form Lining Technology for Large-Diameter Pipelines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86, 213-221.
- [7] 李海生, 赵伟. 基于 ANSYS 的 CIPP 内衬修复管道力学性能模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 876-882.
- [8] 吴刚, 侯士通, 张建, 等. 城市生命线工程安全多层次监测体系与预警技术研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(11): 1-15.
- [9] 孙思男, 郭恩栋, 吴厚礼, 等. 城市地下管网地震灾害情景可视化方法研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 102-109.
- [10] 郁片红, 崔昱. 《排水检查井非开挖修复工程技术规程》关键技术解读[J]. 给水排水, 2024, 60(S1): 818-821.
- [11] 杨毅. 全新的《规范》更高的标准——参与编修《给水排水管道工程施工及验收规范》之体会[J]. 城镇供水, 2010(3): 9-14.
- [12] 刘静, 薛腾飞. 城镇排水管道非开挖修复技术研究[J]. 建材发展导向, 2024, 22(10): 107-110.
- [13] 陈卫平, 李静. 非开挖修复技术在老旧管网改造中的应用与优化[J]. 中国市政工程, 2022, 40(2): 45-49.
- [14] 曹子行, 王飞, 杨琪, 等. 基于 Blender 和 Python 的三维地下管网建模技术应用[J]. 中国给水排水, 2025, 41(24): 70-76.
- [15] 王凯, 刘鹏飞. 城市级地下管网 BIM 建设及应用[J]. 测绘通报, 2022(11): 132-134.
- [16] 郝技. 非开挖修复技术在市政供水管网改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2025, 41(14): 101-106.
- [17] 旷小军, 陈国卿. 浅谈城镇排水管道非开挖修复技术[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 255-256, 258.