

管道非开挖修复技术研究、应用与发展趋势分析

余宏刚 马欣悦 操李璿 袁雨露

安徽职业技术大学, 安徽合肥, 230011;

摘要: 随着我国城市化进程进入中后期, 大规模建设的城市地下管网系统陆续进入老化与病害高发期。传统开挖修复模式因其对社会交通、环境 and 经济造成的重大负面影响, 已难以满足现代城市治理的需求。在此背景下, 管道非开挖修复技术凭借其显著的技术、经济和社会效益, 成为城市基础设施更新与维护的重要手段。本文深入分析了原位固化法(CIPP)、螺旋缠绕法、碎管法和喷涂法等主流非开挖修复技术的原理、优势与局限性。通过引用行业报告、统计数据和案例研究, 系统地探讨了非开挖修复技术在材料、装备、工艺和标准等方面的最新进展。同时, 结合我国“十五五”规划和新型城镇化建设需求, 对该技术面临的挑战和未来发展趋势进行了展望, 旨在为推动我国管道非开挖修复行业的规范化、智能化和产业化发展提供理论依据和实践指导。

关键词: 非开挖修复; CIPP; 城市管网; 病害诊断; 修复材料; 结构性修复

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.056

引言

地下管网是维系城市正常运转的“生命线”和“动脉”, 承担着排水、给水、燃气、热力等重要功能。然而, 经过数十年的运行, 我国城市地下管网普遍面临严峻的老化问题。根据住房和城乡建设部发布的《2024年中国城市建设统计年鉴》数据显示, 全国城市排水管道总长度已超过 95.2 万公里, 且每年以超过 5% 的速度递增^[1]。其中, 有大量 20 世纪八 90 年代埋设的管道仍在超期“服役”。

这些老旧管道普遍存在材质落后(如混凝土管、陶土管、砖砌方沟)、结构性缺陷(破裂、变形、错口)和功能性缺陷(沉积、结垢、树根侵入)等问题。据某大型城市对其中心城区排水管网的普查结果评估, 存在不同程度缺陷的管道比例高达 23.5%, 其中需要立即进行结构性修复的严重缺陷管道占比约 4.2%。管道失效导致的道路塌陷、城市内涝、环境污染等事故频发, 对公共安全构成了严重威胁。

传统的管道修复主要依赖“开膛破肚”式的大开挖技术。该方法不仅需要封闭道路、中断交通, 产生巨大的社会成本, 还会带来噪音扰民、扬尘污染、建筑垃圾堆放等一系列环境问题。以上海市为例, 在中心城区进行一条埋深 3 米的 DN800 排水管开挖修复, 其直接工程成本约为 2500-3500 元/米, 而因交通导改、商业补偿、环境治理等产生的间接社会成本, 据估算可达直接成本的 1.5 至 2 倍。

在此背景下, 非开挖修复技术(Trenchless Rehabilitation Technology)应运而生并迅速发展^[2]。该技术体系通过在管道内部进行作业, 无需或只需少量开挖工作坑, 即可完成对旧管道的修复或更新。其核心优势体现在:

- (1) 社会效益显著: 对地面交通、商业活动和居民生活的影响降至最低。
- (2) 环境影响小: 极大减少了土方开挖量、建筑垃圾和扬尘噪声污染。
- (3) 综合成本低: 虽然单项材料或设备成本较高, 但节省了高昂的开挖、回填和路面恢复费用, 综合经济效益明显。
- (4) 施工周期短: 大部分工艺施工速度快, 能快速恢复管道功能, 提升城市韧性。
- (5) 安全性高: 避免了深基坑开挖带来的施工安全风险和对邻近管线的破坏。

1 主流非开挖修复技术原理与数据化分析

根据修复目标和最终形成的管道结构性能, 非开挖修复技术主要可分为以下几大类:

1.1 原位固化法(Cured-In-Place Pipe, CIPP)

CIPP 是当前全球范围内应用最广泛、技术最成熟的非开挖修复方法, 市场占有率长期保持在 50% 以上。

技术原理: 将浸渍有未固化热固性树脂(如不饱和聚酯树脂、环氧树脂)的纤维软管作为内衬材料, 通过

水压或气压将其翻转或牵拉导入原有管道中,使其紧贴旧管内壁。随后,通过循环热水、蒸汽或紫外线(UV)等热源使其在管道内部发生固化反应,形成一个与旧管紧密贴合的全新结构性“管中管”^[3]。技术经济数据:

适用管径:范围极广,通常为 DN150-DN2700,特殊工艺可处理更大管径。

修复成本:根据管径、修复长度和树脂类型不同,综合成本约为 1500 - 4500 元/米。相较于开挖法,在交通繁忙区域可节约总成本 30%—50%。

施工效率:以蒸汽固化为例,一个标准的 100 米 DN800 管道修复段,从准备到固化完成,通常可在 24—48 小时内完成,效率远高于开挖法。

性能提升:修复后管道内壁光滑,曼宁系数 n 值可降至 0.009-0.011,显著优于混凝土管($n \approx 0.013$),过流能力提升 15%—30%。

优缺点分析:

优点:适用范围广,修复后整体结构性好,内壁光滑,密封性极佳。

缺点:对固化温度与时间控制要求高;施工过程中会产生部分树脂废弃物和清洗废水,需要专业处理。

1.2 螺旋缠绕法 (Spiral Wound Lining)

该方法适用于结构性损坏严重或存在较大变形的管道。

技术原理:将预先成型的 PVC、PE 或带状型材,通过位于人井或工作坑内的缠绕机,在旧管道内部螺旋旋转、互锁,形成一条连续的、独立的新管。新管与旧管之间的环形间隙通常采用水泥浆或化学浆液进行填充。

技术经济数据:

适用管径:DN200-DN3000。

主要优势:可带水作业,对管道原有渗漏和变形适应性强。施工速度极快,据工程实测,缠绕速度可达 1.5-2.5 米/分钟。

局限性:修复后管道过流断面损失相对较大(因衬管自身有厚度);其结构强度在很大程度上依赖于环形间隙的填充质量,若填充不密实,可能导致新管局部失稳。

应用场景:特别适用于大口径雨污水管道的应急抢修和结构性恢复。

1.3 碎管法 (Pipe Bursting)

当原管道管径无法满足现有流量需求时,碎管法是实现管径升级的首选方案。

技术原理:采用液压碎管设备,将一组锥形的碎管头钻入旧管道内部,利用其巨大的静态拉力和振动,将旧管道(混凝土、陶土、铸铁等)破碎并挤压到周围的土体中,同时,在碎管头后方同步拉入一条新的、直径更大(通常可扩大 1-2 级)的 HDPE 或 PVC 管。

技术经济数据:

管径扩大率:通常可扩大 30%-100%。例如,可将一条 DN300 的旧管更换为 DN400 或 DN500 的新管。

施工影响:对周围土体有一定扰动,要求与邻近管线(如燃气、电缆)保持足够的安全距离(通常为 1 米以上)。

成本分析:其成本高于 CIPP 等内衬法,但与“开挖—移除—新铺”的传统升级方案相比,仍具有明显的综合成本优势,尤其在需要扩大管径的场景下。

优缺点分析:

优点:能从根本上解决管道容量不足的问题,实现管道的彻底更新。

缺点:对地质条件和周边环境要求较高,施工风险相对较大。

1.4 喷涂法 (Spray Lining)

喷涂法主要用于解决管道的防腐防渗问题,属于半结构性或非结构性修复。

技术原理:通过遥控喷涂机器人,将双组分环氧树脂、聚脲或聚合物水泥砂浆等材料,高速旋转喷射到旧管道内壁上,形成一层 3—10 毫米厚的连续、致密保护衬层。

技术经济数据:

成本优势:是主流技术中成本最低的一种,约为 500-1500 元/米。

过流影响:对管道过流能力影响极小,断面损失率通常低于 5%。

局限性:无法独立承担外部结构荷载,主要适用于管道结构尚好,但存在轻微裂缝、渗漏或内表面腐蚀的修复场景。

应用场景:给水管道防腐、排水管道防渗及修复轻度腐蚀。

2 非开挖修复技术应用中的关键问题与数据支撑

2.1 精准的修复前检测与评估（“诊断”环节）

“没有检测，就没有修复”。精确的管道内窥检测是成功实施非开挖修复的先决条件。

检测技术：闭路电视（CCTV）检测是主流手段，其提供的视频资料可清晰识别管道缺陷的类型、等级和位置。近年来，声呐检测（用于满水管道）、激光扫描（用于精确测量管道变形量和沉积量）和 QV（快速视觉检测）等技术也得到了广泛应用。

数据化评估：根据《城镇排水管道检测与评估技术规程》（CJJ 181），管道缺陷可分为结构性缺陷和功能缺陷，并采用缺陷分值进行量化评估^[4]。例如，当管道结构性缺陷参数 $F > 40$ ，或平均结构性缺陷密度 > 2.0 时，管道状态评估为 IV 级，需立即进行结构性修复。这种基于数据的科学评估，为修复工艺的选择和修复设计提供了直接依据。

2.2 高性能修复材料的研发与应用

修复材料的性能直接决定了修复后管道的设计寿命（通常要求 50 年以上）。

树脂体系：CIPP 工艺中，树脂是核心材料。针对排水管道的耐腐蚀环境，研发了间苯型不饱和聚酯树脂，其耐酸碱性能优于普通邻苯型树脂。对于给水管道的修复，则必须采用卫生级环氧树脂，其固化体需通过 NSF/ANSI 61 等饮用水接触材料认证。

增强材料：早期的 CIPP 衬管使用针刺无纺布，现在更多采用复合材料，如玻璃纤维、碳纤维或芳纶纤维增强的衬管，其短期弹性模量可超过 8000 MPa，远高于标准要求的 3500 MPa，能提供更高的结构强度^[5]。

材料测试：所有修复材料在投入使用前，必须进行严格的力学性能（抗拉、抗弯、抗压）、化学耐久性（耐酸碱、耐有机物腐蚀）和长期性能（蠕变、疲劳）测试。

2.3 修复后管道的结构设计 with 性能验证

非开挖修复形成的“管中管”是一个复合结构，其力学行为复杂。

设计理论：国际上广泛采用 ASTM F1216 标准进行设计。该标准考虑了两种破坏模式：一是衬管自身被压

屈，二是衬管与旧管组成的复合结构发生整体破坏。设计时需输入旧管道的现有刚度、缺陷尺寸、地下水压力、土压力以及衬管材料的长期弹性模量等关键参数。

性能验证：修复完成后，需通过内窥镜检测确认衬管外观质量，并通过气压试验或水压试验验证其密闭性。对于结构性修复，还可通过现场取样进行力学性能测试，以验证其是否达到设计强度。

2.4 质量验收标准与规范体系的完善

标准化是行业健康发展的保障。我国已初步建立了非开挖修复的标准体系，如《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》（CJJ/T 210）等^[6]。然而，与欧美发达国家相比，我国在材料长期性能数据库、施工过程智能化监控、修复后长期跟踪评估等方面的标准仍有待完善。推动建立覆盖“材料—设计—施工—验收—运维”全生命周期的标准体系，是当前行业发展的迫切任务。

3 发展趋势与展望

基于当前技术瓶颈和市场需求，管道非开挖修复技术正朝着以下方向发展：

3.1 材料创新智能化

快速固化材料：研发常温固化或 UV-LED 低温快速固化树脂，将固化时间缩短 50% 以上，进一步降低能耗、提高工效。

智能材料：开发具有自感知（嵌入光纤传感器监测应力应变）、自修复（微胶囊技术）功能的智能修复材料，实现管道的“状态感知”与“主动防护”。

3.2 装备与施工智能化

机器人化：集成高清视觉、激光测量、机械臂作业的多功能修复机器人将成为标配，实现检测、清理、修复一体化作业。

AI 诊断与决策：利用人工智能（AI）和机器学习技术，对 CCTV 检测视频进行自动缺陷识别与分类，识别准确率已能在特定条件下超过 90%，并能为修复方案提供智能决策支持。

数字化孪生：结合 BIM（建筑信息模型）和 GIS（地理信息系统），构建地下管网的数字孪生体，实现对管道健康状况的实时模拟、预测性维护和修复方案的虚拟验证。

3.2.1 工艺复合化与精细化

针对复杂病害（如局部严重破裂、接口错位），发展“点状 CIPP+整体喷涂”、“碎管法+短管内衬”等复合工艺，实现“一管一策”的精准修复^[7]。

研发针对特殊管材（如预应力钢筒混凝土管 PCCP）和特殊工况（如穿越河流、铁路）的专用非开挖修复技术。

3.2.2 市场应用领域持续拓展

根据 Grand View Research 的报告预测，全球非开挖修复市场在 2025 年至 2030 年期间将以 6.5% 的复合年增长率增长^[8]。其应用领域将从市政排水，加速向城市给水、工业管网、油田管道、电力电缆通道等领域渗透，市场空间巨大。

4 结论

管道非开挖修复技术是现代城市实现精细化、智能化管理和可持续发展的必然选择。通过对主流技术的分析可见，CIPP、螺旋缠绕、碎管、喷涂等技术各具特色，适用于不同的管道病害状况和修复目标。成功的非开挖修复工程，必须建立在精准的前期检测、科学的修复设计、优质的工程材料和规范的施工管理基础之上。

当前，我国非开挖修复行业正处在从“规模扩张”向“质量提升”转型的关键时期。面对巨大的存量管网修复市场，我们应积极拥抱材料科学、人工智能和机器人技术带来的变革，不断完善标准体系，加强专业人才培养，推动非开挖修复技术向更高效、更智能、更环保、更经济的方向发展，从而为保障城市“生命线”的安全、畅通与韧性，构建智慧城市和绿色城市提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]住房和城乡建设部. 2024 年中国城市建设统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2025.
- [2]马保松. 非开挖管道修复更新技术[M]. 北京：人民交通出版社，2014.
- [3]ASTM F1216-16, Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube[S].
- [4]中华人民共和国行业标准. CJJ181-2012 城镇排水管道检测与评估技术规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
- [5]王湛，刘志强. 基于 CIPP 技术的排水管道非开挖修复应用研究[J]. 给水排水，2020, 56(08):110-114.
- [6]中华人民共和国行业标准. CJJ/T210-2014 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2014.
- [7]Boot J. C., et al. Design of linings for the rehabilitation of sewers and pipelines by cured-in-place pipe (CIPP) techniques[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 71: 275-291.
- [8]Grand View Research. Trenchless Pipe Rehabilitation Market Size, Share & Trends Analysis Report[EB/OL]. 2023.

作者简介：余宏刚，硕士研究生，安徽职业技术大学，助教/工程师，研究方向：市政工程。

基金资助：安徽职业技术学院工程造价专业教学资源库（2024xjzyjxzyk01）。