

# 混凝土排水管网结构性病害原位喷筑内衬修复技术综述

杜明瑞<sup>1,2</sup>, 李晨光<sup>1</sup>, 姚煦霏<sup>1</sup>, 方宏远<sup>1,2</sup>, 李 斌<sup>1</sup>, 赵 鹏<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河实验室(河南), 河南 郑州 450046; 3. 郑州安源工程技术有限公司, 河南 郑州 450047)

**摘 要:**城市地下排水管网中的混凝土管道在化学-生物腐蚀与荷载作用下易发生渗漏、开裂等结构性病害,威胁城市公共安全。传统开挖修复弊端显著,非开挖原位喷筑内衬修复技术因此成为重要发展方向。综述了混凝土排水管道的损伤机理与喷筑修复材料的研究进展。首先,分析了管道在多因素作用下的损伤演化规律,明确各类损伤对修复材料的性能要求,聚焦水泥基与高分子两类喷筑修复材料。水泥基材料通过纤维增韧与微观结构优化,在结构性补强与裂缝控制方面表现突出;高分子材料则凭借高弹性、快速固化与卓越耐腐蚀性,在防渗与变形适应方面具有独特优势。其次,分析了屏障隔绝、界面黏结与协同变形、复合结构增强这3个方面机理,论证修复层通过物理隔离、应力分担与整体结构提升实现管道修复与承载力恢复。最后,结合智能修复与绿色材料的发展趋势,提出喷涂修复技术应向绿色低碳自修复材料开发、施工智能化升级及多性能协同设计理论等方向深入发展,为提升城市排水管网长期安全运行水平提供理论支持与技术参考。

**关键词:**混凝土排水管网; 水泥基材料; 高分子材料; 原位喷筑内衬; 修复理论

**中图分类号:** TU992.05; TU991.33

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2027.01.003

城市地下排水管网是保障城市公共卫生、防洪排涝及正常运转的关键基础设施。随着中国城镇化加速,地下管网规模持续扩大,混凝土管道因其取材方便、制造工艺成熟及承压性能好等优点,在排水管网中占比高达约80%<sup>[1]</sup>。然而,混凝土管道在长期运行中面临严峻考验,一方面管道内部输送的生活污水和工业废水中富含硫酸盐、氯离子、酸性介质及大量微生物群落<sup>[2]</sup>,这些介质会诱发复杂的化学腐蚀与微生物诱导腐蚀;另一方面管道外部承受上覆土体压力、地面交通动载及流体冲刷等多重耦合作用<sup>[3]</sup>。在这两个方面作用下管道中渗漏、开裂、腐蚀和错口脱节等结构性病害普遍存在(如图1所示),因此混凝土排水管道的平均使用寿命仅为设计寿命的1/5至1/10,承载力也明显降低<sup>[4]</sup>。表1统计了部分城市受检排水管网的病害检测情况,统计结果表明,排水管道结构类病害与功能性病害普

遍存在,结构性病害累计长度较长,其中管壁腐蚀占比超过90%。此类病害不仅削弱管道输水功能,更会引发水土污染、道路塌陷等城市次生灾害,对公共安全构成极大威胁<sup>[5]</sup>。

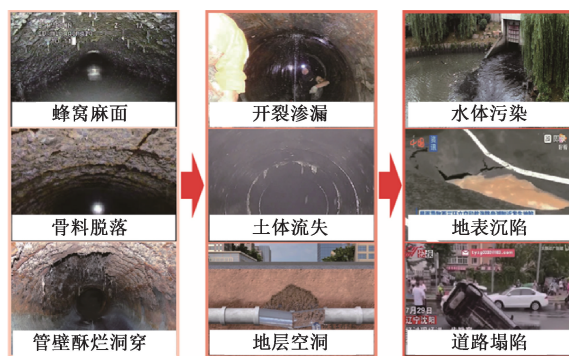


图1 受损混凝土排水管道及其诱发的城市公共安全事故  
Figure 1 Damaged concrete drainage pipes and resulting urban public safety incidents

收稿日期:2026-05-30;修订日期:2026-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278378);河南省自然科学基金优青资助项目(232300421066, 242102230135)

作者简介:杜明瑞(1989—),男,河南鹤壁人,郑州大学研究员,博士,博士生导师,主要从事绿色土木工程材料与地下工程安全防护方面的研究,E-mail: dumingrui@zzu.edu.cn。

通信作者:姚煦霏(1993—),男,河南郑州人,郑州大学副研究员,博士,主要从事混凝土多尺度特性研究与深度学习神经网络方面的研究,E-mail: xupeiyaoy@zzu.edu.cn。

表 1 中国部分城市的地下排水管道病害情况检测结果  
Table 1 Inspection results on the condition of underground drainage pipelines in selected Chinese cities

| 城市 | 检测范围     | 病害情况(每公里) |         |
|----|----------|-----------|---------|
|    |          | 结构性病害     | 功能性病害   |
| 广州 | 9 485 km | 5.18 处    | 10.7 处  |
| 成都 | 4 500 km | 73.06 处   | 36.4 处  |
| 温州 | 373 km   | 6.03 处    | —       |
| 昆山 | 5 700 km | 4.38 处    | 5.11 处  |
| 郑州 | 514 km   | 29.14 处   | 12.58 处 |

传统开挖换管的修复方法存在施工周期长、综合成本高、交通阻碍严重、环境影响大等弊端<sup>[6]</sup>,难以满足现代城市可持续发展要求。非开挖修复技术应运而生并迅速发展<sup>[7]</sup>。其中,原位喷筑内衬法凭借其灵活性强、对管道过流断面影响小、施工效率高、环境友好等优势备受青睐<sup>[8]</sup>。该方法通过在旧管道内壁喷涂高性能修复材料,形成新的复合结构,可以恢复甚至提升管道的整体性能。

喷筑修复效果的核心在于修复材料。近年来修复材料体系呈现出从单一走向复合、从普通迈向高性能的明显趋势。以水泥基喷筑材料为例,当前已从传统水泥砂浆发展为各类纤维增强水泥砂浆。通过掺入 PVA、PP 或钢纤维,显著提升材料的韧性、抗裂性和抗冲击性<sup>[9]</sup>。此外,以高延性水泥基复合材料和超高性能混凝土为代表的新型水泥基材料进一步实现了性能的提升。ECC 材料在拉伸荷载下能表现出独特的应变硬化和多缝开裂特性,具备出色的韧性、耐久性以及自修复能力<sup>[10]</sup>。UHPC 则通过协同掺入硅灰和纤维实现极低的孔隙率,表现出优异的耐久性<sup>[11]</sup>。另一方面,环氧树脂、聚氨酯和聚脲等有机高分子喷筑材料凭借快速固化、化学稳定性高和黏结强度大等优点,在管道修复领域展现出广阔的应用潜力<sup>[12]</sup>。

然而,针对混凝土排水管道在严苛腐蚀与复杂荷载耦合环境下的修复,现有研究仍存在有待梳理的问题。一方面混凝土管道在多因素耦合作用下的损伤演化机理尚未形成统一的理论框架;另一方面修复材料的研发虽呈多元化发展,但其性能演进的内在逻辑、长期服役下的修复效果与失效机制仍缺乏深度比较与机理剖析。本文旨在分析混凝土排水管道在化学、生物及力学等多因素作用下的损伤劣化规律,聚焦喷筑修复材料的性能特点、加固机制与长期耐久性,并阐释其实现结构修复与长效防护的内在机理,为高性能修复材料的研发与工程应用提供理论参考。

1 混凝土排水管道病害形成机理及喷涂修复材料关键性能要求

1.1 病害形成机理

混凝土排水管道在服役过程中长期处于复杂环境中(图 2),结构性病害主要表现为材料劣化与力学损伤两类:前者包括化学侵蚀、微生物腐蚀等导致的管壁材料受损、剥落及钢筋锈蚀<sup>[13]</sup>;后者包括裂缝、破裂、变形、接口错位及管道起伏等<sup>[14]</sup>,两种损伤形态示例如图 3 所示。对病害进行评价是管道健康诊断的核心,材料劣化主要考察腐蚀深度、强度损失及腐蚀产物剖面分布(通过扫描电镜、X 射线衍射等手段测定);力学损伤则依赖裂缝尺寸、管体变形量等参数。当前检测技术已从人工排查发展为智能化无损探测,如搭载摄像头与激光测距仪的管道检测机器人可实现 360°摄像与病害精准定位<sup>[15]</sup>,结合潜望镜检测、声纳检测以及电法测漏检测等技术形成了一个多维度、可视化的管道健康状况评价体系,为养护与修复提供了科学的数据支撑。

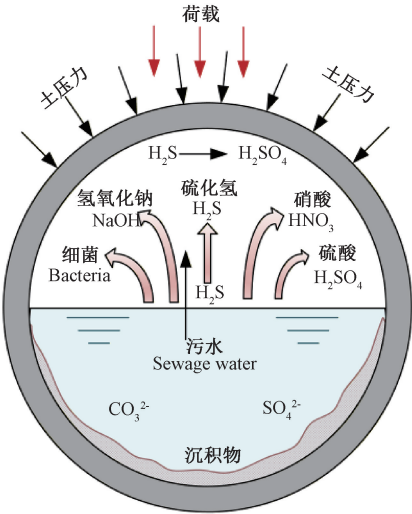


图 2 管道环境示意图

Figure 2 Pipeline environment schematic diagram

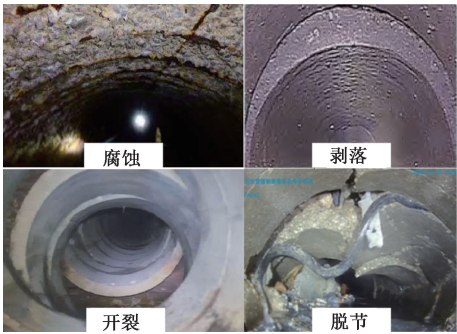


图 3 管道病害损伤形态示例<sup>[10]</sup>

Figure 3 Samples of pipeline disease damage morphology<sup>[10]</sup>

混凝土管道病害的形成与发展通常源于环境侵蚀与力学损伤的协同作用。管道输送的污水中通常含有硫酸盐、氯离子及各类酸性介质,这些物质会通过扩散、渗透侵入管壁,引发材料劣化<sup>[16]</sup>。环境侵蚀中微生物诱导腐蚀破坏性最强,其过程一般始于硫酸盐还原菌将硫酸盐转化为硫化氢;当管壁表面pH 值降低后,嗜中性硫氧化菌定殖并将硫化氢氧化为硫酸,pH 值降至4~5;随后嗜酸性硫氧化菌成为优势菌群,持续产生高浓度生物硫酸(pH 值可低至1~2),对混凝土造成剧烈腐蚀<sup>[13]</sup>。材料劣化会削弱管道抵抗外力的能力,从而进入损伤加速阶段。路面交通荷载不仅带来附加应力,其诱发的应力循环也会造成管道材料及接口的疲劳损伤<sup>[14]</sup>。此外,若管道渗漏导致周边土体流失,其受力状态将转变为非均匀受弯,管侧等部位可能产生纵向裂缝<sup>[17]</sup>。地基不均匀沉降则迫使管道强制变形,产生附加弯曲应力,接口管道易造成断裂。

荷载与环境侵蚀并非孤立作用,而是存在显著协同效应。环境侵蚀导致材料流失、钢筋截面积减小及黏结力退化削弱了管道抵抗外力的能力,使其更易开裂;而裂缝又为腐蚀性介质提供侵入通道,进一步促使裂缝扩展,形成“腐蚀促使开裂,开裂加剧腐蚀”的循环。最终,严重的结构性病害可引发管体局部坍塌或整体失稳,进而导致水土流失和路面沉陷,对城市公共安全构成严重威胁。

1.2 喷涂修复材料关键性能要求

针对材料劣化型病害,修复材料须具备卓越的耐久性,核心在于提升其耐腐蚀性与抗渗性,使材料能长期抵抗污水中硫酸盐、氯离子及微生物代谢酸等介质的侵蚀。具体指标体现为较低的离子渗透系数、腐蚀环境下的高强度保留率与低质量损失率。高密实度与抗渗能力共同构成了阻隔腐蚀介质侵入的第一道物理屏障,结合优良的抗裂性能从根源上延缓腐蚀进程。针对力学损伤型病害,修复的关键在于恢复并提升结构承载力。材料需具备较高的抗

压、抗拉、抗弯强度及韧性,对于吸收变形能量、防止脆性破坏至关重要。此外,材料的弹性模量与热膨胀系数应与原管道匹配,并具备优异的界面黏结性能,以保障荷载有效传递与复合结构整体性。

为阻断“腐蚀促使开裂,开裂加剧腐蚀”的协同损伤机理,修复材料需具备主动抗裂与损伤自抑制能力,如低塑性收缩、高断裂能等特性。在施工方面,材料需兼具良好流动性与可泵送性以适应长距离输送,同时具备较低的垂流度以保证在垂直或管顶部位的成型质量。纤维长度与掺量应合理控制,以避免堵塞设备或影响喷涂层均匀性;凝结时间的可控性则有助于平衡施工操作与早期强度发展,确保施工效率与衬层质量。

2 基于水泥基材料的管道原位喷筑修复研究

2.1 材料研发

早期的管道修复主要采用传统水泥砂浆,修复主要体现在3个方面:水泥水化后形成富含氢氧化钙的碱性环境有助于管道内壁形成钝化保护膜;砂浆层本身可作为物理隔离层将管体与腐蚀性介质隔离;砂浆较高的电阻能够减缓电化学腐蚀速度<sup>[16]</sup>。然而,传统水泥砂浆属于脆性材料,抗拉强度较低、收缩性大、容易开裂<sup>[18]</sup>。管道后期变形时内衬层会出现裂缝并导致修复失效。因此早期水泥砂浆材料主要着眼于恢复管道的“防渗防腐”功能,对结构补强的作用有限,难以应对原有管道已存在的结构性缺陷,或在复杂受力环境下的长期服役要求。

为了改进上述缺陷,纤维增强技术被引入,通过在砂浆中掺入如钢纤维、合成聚合物纤维或天然纤维<sup>[13,18]</sup>,提升水泥砂浆材料的韧性与抗裂性,表2展示了纤维增强水泥砂浆材料中常用的纤维种类及参数<sup>[19]</sup>。纤维的主要作用是桥接裂缝:微裂纹阶段,纤维能传递应力,抑制裂纹扩展,提升材料的抗拉与抗弯强度;裂缝扩展时,纤维的拔出需要消耗能量,赋予了材料一定的延性和较高的断裂能。

表2 纤维增强水泥砂浆材料中常用的纤维<sup>[19]</sup>

Table 2 Commonly used fibers in fiber-reinforced cementitious mortar materials<sup>[19]</sup>

| 纤维类型   | 长度/mm | 直径/mm     | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 抗拉强度/MPa    | 弹性模量/GPa  | 伸长率/%   |
|--------|-------|-----------|--------------------------|-------------|-----------|---------|
| 聚丙烯纤维  | 8~20  | 12        | 0.91~0.97                | 850         | 6.0       | 21      |
| 聚乙烯醇纤维 | 8~12  | 39        | 1.3                      | 1 600       | 42.8      | 6~8     |
| 聚乙烯纤维  | 8~18  | 20~38     | 0.97                     | 3 000       | 100       | 2~3     |
| 钢纤维    | 6~15  | 100~1 000 | 7.8                      | 350~3 000   | 210       | 2~4     |
| 耐碱玻璃纤维 | 5~20  | 13~15     | 2.4~2.76                 | 2 000~4 000 | 70~80     | 2.0~3.5 |
| 玄武岩纤维  | 15~30 | 6~20      | 2.6~2.8                  | 2 230~4 840 | 85.8~89.0 | 2.8~3.1 |
| 碳纤维    | 3~6   | 5~10      | 1.57~1.8                 | 525~4 660   | 33~268    | 0.8~2.4 |



超高性能混凝土 (UHPC)<sup>[20]</sup> 基于最大堆积密度理论,通过剔除粗骨料、优化胶凝材料与级配石英砂配比并采用极低水胶比,实现高密实度与优异的力学性能<sup>[21]</sup>。

ECC 是一种特殊的纤维增强水泥基复合材料,基于微观力学设计方法在拉伸下表现出超高的延性。与普通混凝土的单裂纹脆性断裂不同,ECC 在受拉时呈现应变硬化行为,首裂后承载力持续上升,并形成大量均匀分布的细密微裂纹,极限拉应变可达 3% 以上(图 4)<sup>[19,22]</sup>。这种多缝开裂机制赋予了 ECC 优异的延性和能量吸收能力(图 5),使其抗弯、抗剪、抗疲劳性能极为突出。此外,其微裂纹特性还带来低渗透性,能有效抵抗有害介质的侵入,并具备一定的自修复能力<sup>[10]</sup>。王天宇<sup>[23]</sup>研发了适用于混凝土管道离心喷涂修复的 ECC 材料,试验表明,喷涂的 ECC 内衬层能与旧混凝土管道协同工作,将复合管道的极限承载力提升 100% 至 600%,实现了对混凝土管道的结构性修复(图 6)。

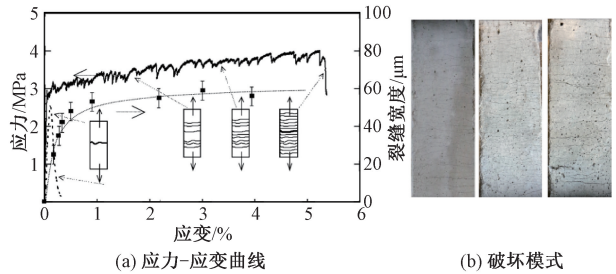


图 4 ECC 材料的拉伸应力-应变曲线及破坏模式<sup>[19,22]</sup>  
Figure 4 Stress-strain curves and failure modes of ECC materials under tensile loading<sup>[19,22]</sup>

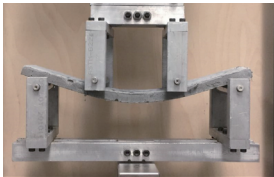


图 5 弯曲荷载下 ECC 材料的变形破坏特征<sup>[19]</sup>  
Figure 5 Deformation and failure characteristics of ECC materials under bending loads<sup>[19]</sup>

针对纤维对水泥砂浆性能的增强效果,Dawood 等<sup>[24]</sup>发现,钢纤维与棕榈纤维、合成纤维混杂后材料劈拉强度和弯曲强度分别提高约 44% 和 140%。聚丙烯(PP)纤维在控制收缩裂缝、保持施工流动性方面具有优势。Sanjuan 等<sup>[25]</sup>发现 PP 纤维能有效增加砂浆强度、减少塑性收缩开裂,在腐蚀环境下表现出裂纹自修复能力。聚乙烯醇(PVA)纤维具有高模量和与水泥基体的良好黏结性,在提升强度的同时保持了优异的施工性能。Zhang 等<sup>[26]</sup>研发的

PVA 纤维增强复合水泥砂浆 3 d 抗压、抗折强度分别达 58.2 MPa 和 11.2 MPa,28 d 强度分别增至 72.7 MPa 和 13.2 MPa。Yu 等<sup>[27]</sup>研发的超高性能 ECC 拉伸强度和伸长率分别达到 20 MPa 和 8.7%。Sun 等<sup>[28]</sup>发现,掺入质量分数 25% 的聚乙烯可使材料弯曲强度从 5.5 MPa 大幅提升至 18.2 MPa。

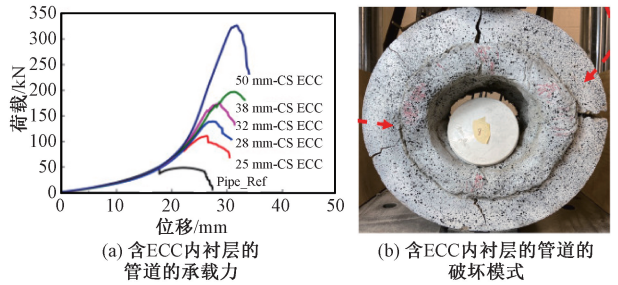


图 6 基于 ECC 材料的管道喷涂修复试验及修复后的承载特性<sup>[23]</sup>  
Figure 6 Spray-coating repair test of pipes using ECC materials and load-bearing characteristics after repair<sup>[23]</sup>

纤维参数对砂浆性能亦有重要影响,Aydin 等<sup>[29]</sup>发现钢纤维长度从 6 mm 增加至 13 mm 时,钢纤维增强碱矿渣/硅灰砂浆的力学性能显著提升,且干燥收缩率随纤维用量增加而降低。PP 纤维长度在 6~12 mm 时纤维掺量和流动性负相关,掺量 $\leq 0.9\%$ 时可兼顾良好流动性与可喷涂性<sup>[30]</sup>;直径较小的纤维有助于提升初始开裂强度,而较粗纤维则在裂缝扩展阶段表现出更显著的拉伸硬化效应<sup>[31]</sup>。PVA 纤维长度为 6 mm、体积掺量为 0.75% 时材料碳化耐受性提升最为显著<sup>[32]</sup>。通过系统优化纤维参数可实现施工性能、力学行为与长期耐久性的协同提升。

当前商业化高性能修复砂浆发展迅速(如图 7 所示的中国自主研发的砼盾 H-70 型非开挖修复砂浆<sup>[33]</sup>),正是纤维增强技术的产物,性能参数见表 3。此类材料具备速凝、早强、高强及优异的抗渗、抗冻融和耐化学侵蚀特性,为管道快速修复与长效服役提供了材料基础。



图 7 国产纤维增强高性能复合水泥喷涂砂浆(砼盾 H-70)及其应用现场<sup>[33]</sup>  
Figure 7 Domestic fiber-reinforced high-performance composite cement spray mortar (Concrete Shield H-70) and its application site<sup>[33]</sup>



表 3 高性能复合水泥砂浆喷涂砂浆材料的关键技术参数<sup>[33]</sup>

Table 3 Key technical parameters of high-performance composite cementitious spray mortar materials<sup>[33]</sup>

| 材料型号     | 凝结时间/min |      | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      | 抗剪强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/MPa | 快速氯离子渗透/C | 流挂 |
|----------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|----------|----------|-----------|----|
|          | 初凝       | 终凝   | 1 d      | 28 d | 1 d      | 28 d | 28 d     | 28 d     | 28 d     |           |    |
| PL-12000 | ≤120     | ≤240 | 34.5     | 80   | 5.2      | 8.3  | 11.9     | 4.6      | 36 000   | <500      | 无  |
| PL-8000  | ≤120     | ≤240 | 20.7     | 55   | 4.1      | 7.4  | 14.5     | 4.7      | 36 000   | <500      | 无  |
| MS-10000 | ≤120     | ≤240 | 20.7     | 70   | 2.7      | 10.3 | 13.8     | 5.5      | 36 000   | <500      | 无  |
| 砼盾 H-70  | ≤120     | ≤360 | ≥25      | ≥65  | ≥3.5     | ≥9.5 |          |          | ≥30 000  | ≤100      |    |

2.2 施工工艺

与材料研发同步发展的是施工工艺的机械化和精准化。修复工艺经历了从完全依赖人工到高度机械化、智能化的演变。最初的人工刮涂法依赖施工经验,灵活性强,可适应管道内表面不平整等复杂部位,但劳动强度大、效率低、质量依赖人工,且在管径较小或管道较长时受限严重。为克服人工局限,喷涂工艺快速发展,主要包括喷涂法、离心法、联合法、拖拉式喷涂法及风送挤涂法等<sup>[33]</sup>。喷涂法借助旋转喷头将砂浆甩贴至管壁并用刮板抹平,适用于预制与现场修复,但厚度均匀性较难控制;离心法依靠喷头高速旋转使砂浆均匀成型,适合中小直径圆形管道原位修复,在大管径(>1 400 mm)时施工难度增加,易发生离析;联合法兼顾施工灵活与成型均匀;拖拉式喷涂法通过边喷浆边回拖实现连续内衬成型,兼具预制与现场应用的灵活性;油气管道中常采用的风送挤涂法利用压缩空气推动涂管器一次性刮抹数公里管道,效率高,但对涂层均匀性与连续性控制要求较高<sup>[34]</sup>。

当前地下排水管道修复中主流工艺为人工喷涂法与离心喷涂法。人工喷涂设备(图 8)已高度集成化。其工作流程为将干粉砂浆与水在地面搅拌成浆体,经软管泵送至管道内,操控喷枪将砂浆雾化喷射至管壁。该方法可适应各类断面形状的管道,并可与“挂网支护”技术结合,显著提升内衬整体性与抗裂性,适用于对结构补强要求较高的场景。但该工艺依赖人工操作,喷涂厚度均匀性与界面处理质量易受施工经验影响,智能化水平有限。离心喷涂修复法(图 9)专为中小直径圆形管道设计。施工时将搅拌均匀的砂浆泵送至旋喷器,在离心力作用下高速甩出,均匀黏结于管壁,旋喷器沿管道轴线移动,形成连续致密的环形内衬。该工艺无须人员进入管道,自动化施工保证了内衬厚度与密实度的均匀性,具有高效、安全、均质的特点。其局限性在于:连续喷涂距离一般不超过 200 m,过长易导致输料管堵塞;适用管径通常为 600 mm 至 1 400 mm,管径过小

会造成砂浆回弹损失严重,管径过大则离心力不足以保障黏结牢固。

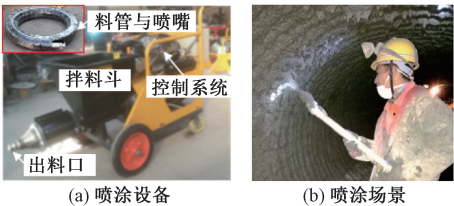


图 8 地下排水管道人工喷涂水泥砂浆的设备及过程  
Figure 8 Equipment and process for manual spray of cement mortar on underground drainage pipelines

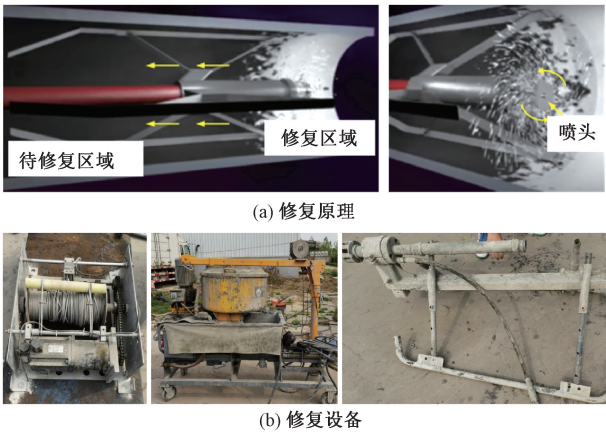


图 9 地下排水管道水泥砂浆离心喷涂工作原理及设备  
Figure 9 Working principle and equipment for centrifugal spray of cement mortar in underground drainage pipelines

3 基于高分子材料的管道原位喷筑修复研究

3.1 材料研发

高分子材料凭借可喷涂性、快速固化、优异的耐腐蚀性和韧性等优点,成为水泥基材料的重要补充。其核心包括环氧树脂、聚氨酯与聚脲,通过现场快速聚合形成致密保护层,实现从被动防腐到主动密封与结构协同增强的修复效果。环氧树脂与固化剂发生反应后形成三维网状结构,该结构赋予其极高的刚性与黏结强度<sup>[35]</sup>;聚氨酯由多元醇与多异氰酸酯聚合而成,兼具弹性与韧性<sup>[36]</sup>;聚脲由异氰酸酯与胺基化合物反应生成,固化快,柔韧性、耐老化及耐腐蚀性能更优。三类材料均在建筑、交通等领域有

了数十年的成功应用<sup>[37]</sup>。

基于上述应用经验,高分子材料于 20 世纪后期被引入管道修复领域。最初应用于金属管道的内外防腐涂层,后扩展至混凝土管道。1989 年英国颁布相关标准后,环氧树脂喷涂修复技术在日本、瑞典、德国及中国等地得到快速推广与应用<sup>[11]</sup>。中国近年来相继颁布 CJJ/T 210—2014《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》<sup>[38]</sup>等标准,对管道病害检测、修复材料性能、施工工艺及质量验收等环节进行了规定。实践表明,环氧树脂喷涂能有效解决供水管道接口渗漏、改善水质,广泛应用于混凝土排水管道、检查井及污水池的防渗与结构补强<sup>[39]</sup>。聚氨酯喷涂修复技术在输油、给排水等多种管道修复中得到了广泛应用<sup>[40]</sup>。聚脲自 20 世纪 90 年代末兴起,以其超快反应速度和卓越物理性能在全球管道防腐抗渗工程中获得广泛应用。但现有标准仍侧重

施工工艺与验收,缺乏基于病害程度、荷载条件与腐蚀环境的结构设计方法,对高分子内衬与原管道协同承载机制及复合结构承载力评价尚未形成统一方法,制约了技术向精细化方向发展。

表 4 展示了这 3 种材料的性能特性<sup>[41]</sup>。环氧树脂呈硬脆特征,适用于抗压、抗磨损要求高且变形小的结构性修复与防腐。聚氨酯与聚脲属高弹性材料,断裂伸长率最高分别达 480%和 1 000%,撕裂强度高,能适应管道较大变形(图 10)<sup>[42]</sup>。其中聚脲固化速度和耐候性更优。3 种材料与混凝土黏结强度达 2~5 MPa,可形成致密光滑内衬层(图 11),在维持过流断面的同时显著提升输水能力。耐久性研究证实,高分子材料涂层能极大延缓氯离子、硫酸等介质的渗透,将混凝土结构的服役寿命延长数十倍。如用环氧树脂进行内衬修复后的管道服役寿命估计可达 30~50 a<sup>[43]</sup>。

表 4 管道高分子材料喷涂修复材料的基本性能<sup>[41]</sup>

Table 4 Fundamental properties of pipeline polymer spray repair materials<sup>[41]</sup>

|      | 固含量/%  | 适用温度/℃ | 固化情况                       | 拉伸强度/MPa | 断裂伸长率/% | 撕裂强度/kN/mm | 弯曲强度/MPa | 弯曲模量/MPa | 邵氏硬度/D | 粘附力(金属)/MPa | 粘附力(混凝土)/MPa |
|------|--------|--------|----------------------------|----------|---------|------------|----------|----------|--------|-------------|--------------|
| 环氧树脂 | >60    | 4~35   | 表干: 2~3 h;<br>实干: <24 h;   | 20~27    | 2~3     | 30~40      | >50      |          | 60~70  | 9~25        | 2~5          |
| 聚氨酯  | 90~100 | -40~50 | 表干: <60 s;<br>实干: <3 h;    | 15~20    | 200~480 | 60~70      |          |          | 60~70  | 9~25        | 2~5          |
| 聚脲   | 95~100 | -40~50 | 表干: 2~15 s;<br>触干: 50~80 s | 10~40    | 5~1 000 | 9~150      | 20~25    | >650     | 20~90  | 7~15        | 2~5          |



图 10 含聚脲内衬层的钢管在接口处开裂后的情况<sup>[42]</sup>

Figure 10 Condition of steel pipe with polyurea lining after cracking at the joint<sup>[42]</sup>

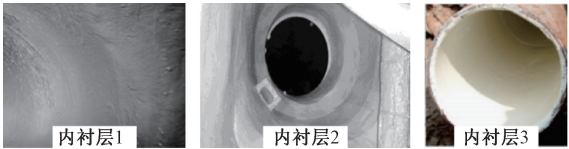


图 11 高分子材料在管道内壁上形成的内衬层  
Figure 11 Linings formed by polymer-based materials on the inner wall of pipelines

材料科学的进步促进了高分子修复材料的发展。可通过分子结构设计与复合材料改性实现精准改性。例如,针对环氧树脂的脆性,可通过橡胶、热塑性聚合物或有机硅进行增韧改性<sup>[43]</sup>。纳米改性技术尤为突出,将碳纳米管、氧化石墨烯等均匀分散

于基体中,可显著提升其拉伸强度、模量及耐腐蚀性,已有研究将碳纳米管用于增强聚脲以改善界面性能与承载能力<sup>[44]</sup>。这些特性使得高分子材料能够针对特定腐蚀环境、力学要求或特殊施工条件进行配方优化,展现出广阔的应用前景。

3.2 施工工艺

采用高分子材料进行喷涂内衬修复时原料通常为双组份,修复工艺的核心挑战在于实现高活性液态原料的快速精确混合与均匀喷涂。为此发展出空气喷涂、高压无气喷涂等工艺,它们共同的特点是“边混合、边喷涂”,但原理与适用场景各有侧重。

空气喷涂<sup>[45]</sup>利用压缩空气在喷嘴处产生负压,将原料吸出并雾化,喷射至物体表面形成涂层。其优点是雾化效果好、涂层均匀、适应复杂表面。但材料利用率较低(约 50%~60%),且漆雾逸散可能损害人体健康,对作业环境要求也较高。高压无气喷涂<sup>[46]</sup>依靠高压泵(10~30 MPa)将原料推送至喷嘴,喷出瞬间与空气撞击雾化,形成涂层。该工艺无须

压缩空气参与雾化,雾化效果好、附着力强、施工效率高,适用于大面积作业,且对材料黏度适应范围宽,涂层质量更优。根据喷涂器形式可分为手持式(图 12(a))与非手持自行走式(图 12(b)):前者施工灵活,适用于人员可进入的大管径场合;后者自动化程度高,适用于人员无法进入的中小管径管道。旋风喷涂法专为小管径(通常公称直径 200 mm 以下)长距离金属管道设计。其原理是将涂料与压缩空气混合后注入管道,形成环状气液两相流,利用气流旋动使涂料均匀涂覆于管周内壁,一次施工可达上千米,效率高,且不受弯头、阀门影响。但该工艺受环境温度(不宜低于 10 ℃)和天气制约较大,作业噪音高,通常仅能日间施工。

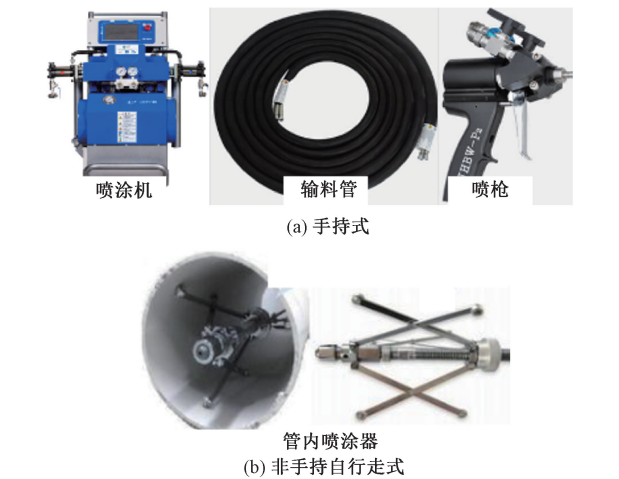


Figure 12 Airless spray equipment for pipelines

喷涂工艺的选择需综合考虑管径、材质、长度、环境及修复目标。目前,高压无气喷涂因其综合性能优异成为主流,相关设备已实现国产化并稳定应用。相较于水泥基材料,高分子材料喷筑施工对设备精度与操作规范性要求更高,但现有设备智能化

程度不足,双组份混合比例、喷涂速度等参数难以实时精准调控,且缺乏智能化质量监测手段,施工智能化水平有待进一步提升。

## 4 喷涂材料性能对比及修复机理

### 4.1 性能对比与修复效果

水泥基材料中,普通水泥砂浆的成本较低,工艺简单,但脆性大、易收缩开裂,结构补强能力弱<sup>[18]</sup>。ECC 的核心优势在于高延性与卓越的裂缝控制能力,极限拉应变可达 3%~5%,可使管道极限承载力提升且破坏时保持整体性<sup>[19]</sup>。UHPC 凭借超高强度与极低渗透性,适用于严苛环境下的耐久性修复<sup>[21]</sup>。高分子材料中,环氧树脂“刚而脆”,拉伸强度高(20~27 MPa),但断裂伸长率低(约 3%),限制了变形能力<sup>[35]</sup>,适用于对抗压、耐磨和刚性支撑要求高的结构性补强。聚氨酯弹性好且具有一定的韧性,断裂伸长率高(最高可达 480%),能适应管道一定的变形,兼顾良好的柔韧性和耐久性<sup>[36]</sup>。聚脲固化快、断裂伸长率极高,在管道显著变形或接口微开裂时仍能保持密封,适合柔性防渗与快速修复<sup>[42]</sup>。

表 5 为水泥基材料及高分子材料修复性能对比。

由表 5 可知,水泥基修复材料可作为结构层,提供良好的承载能力和力学修复效果;高分子材料可作为功能层,实现防腐防渗,且涂层薄,但对严重结构损伤的补强能力有限。实际工程中宜采用水泥基材料恢复结构承载力,再叠加高分子材料形成“刚柔结合”的长效防护。在经济性与环境友好性方面,水泥基材料直接成本较低,但水泥生产碳排放较高,可通过掺入矿渣、粉煤灰等固废降低碳足迹;高分子材料单价较高,但涂层薄、固化快,能显著减少

表 5 水泥基材料及高分子材料修复性能对比

Table 5 Comparison of cement-based and polymer-based materials in repair performances

| 种类    | 名称     | 核心力学特性        | 耐久性           | 界面特性           | 修复厚度 | 修复效果        |
|-------|--------|---------------|---------------|----------------|------|-------------|
| 水泥基材料 | 普通水泥砂浆 | 抗压尚可、抗拉低、脆性   | 抗渗性一般、易化学腐蚀   | 界面黏结依赖处理       | 较厚   | 基础防渗防腐      |
|       | ECC    | 高韧性、应变硬化、多缝开裂 | 抗渗性好、有自修复潜能   | 界面要求高          | 较厚   | 结构性补强与裂缝控制  |
|       | UHPC   | 超高强、高密实       | 抗渗性、耐腐蚀性极优    | 流动性要求高         | 一般   | 结构性补强与高耐久防护 |
| 高分子材料 | 环氧树脂   | 高强、高硬、高黏结、脆性大 | 耐化学腐蚀性极优、抗渗性强 | 附着力强、固化收缩小     | 超薄   | 刚性防腐与局部补强   |
|       | 聚氨酯    | 高弹性、良好韧性      | 耐化学腐蚀性好、柔韧抗裂  | 附着力强、固化较快      | 超薄   | 柔性防渗与变形适应   |
|       | 聚脲     | 超高弹性、优异韧性、固化快 | 耐腐蚀、耐老化性优异    | 附着力强、固化快、对湿度敏感 | 超薄   | 长效柔性防渗与快速修复 |



施工能耗和交通中断时间,综合碳排放相对较低,不过原料存在毒性且固化后难降解。两类材料均已得到工程验证,但仍存在不足。水泥基材料为达到结构补强通常需较大厚度,会明显减小管道过流断面,且流变性、附着性、凝结时间等施工性能常与力学性能相互矛盾,配比优化难度大<sup>[19]</sup>。高分子材料对基面清洁度、干燥度和粗糙度要求高,固化受温度、湿度影响大,部分材料在长期酸性或干湿循环环境中易发生水解老化,导致力学性能下降。

4.2 喷涂修复机理

尽管材料体系不同,但水泥基材料和高分子材料实现有效修复的作用机理均遵循一个理论框架,在修复过程中分为3个方面。

首先是屏障隔绝机理,这是所有修复材料最基础的功能(图13)。其核心在于通过材料的高密实度或低渗透性,物理阻断水、腐蚀性离子(如 $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )、气体(如 $\text{H}_2\text{S}$ )及微生物向管体基质的传输。水泥基材料通过低水胶比、掺入活性矿物掺合料及颗粒紧密堆积优化孔隙结构以降低渗透系数;同时纤维的加入可细化裂纹,延长介质侵入路径。高分子材料固化后形成连续致密的膜层,对酸碱盐等介质具有高度化学惰性和极低渗透率。研究表明,优质环氧树脂或聚氨酯涂层可使氯离子渗透速率降低一个数量级以上<sup>[12]</sup>。研究表明聚脲材料在多种腐蚀液中浸泡后性能衰减极小。环氧树脂内衬可显著抑制管道内微生物生长,这与其隔绝了微生物代谢所需水分和养分直接相关。这些理论在工程实践中也得到了印证,如陆浑灌区渡槽修复工程中,喷涂双组份聚脲弹性体用于处理槽身开裂和漏水,其核心作用正是依靠优异的抗渗性形成可靠的防水屏障。因此,内衬层通过将管体与腐蚀环境彻底隔离,从源头遏制了化学腐蚀、微生物腐蚀及冻融破坏等耐久性病害的进一步发展。

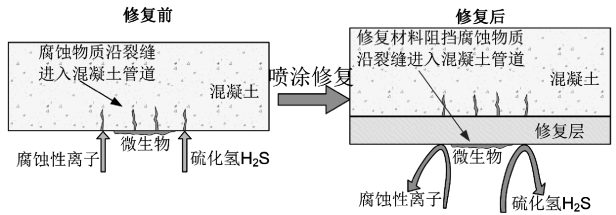


图13 屏障隔绝机理

Figure 13 Barrier isolation mechanism

其次为界面黏结与协同变形机理。修复后管道的长期稳定性取决于修复材料与原混凝土能否协同工作,其关键在于界面黏结与协调变形能力。如图14所示,通过基面处理(高压水射流、凿毛)可以创

造清洁粗糙的表面以增强机械咬合力。水泥基材料借助水化产物形成化学黏结,高分子材料(尤其是环氧树脂)则依靠极性基团产生强化学黏结。界面作为修复体系的薄弱环节,其黏结强度直接影响荷载传递效率<sup>[23-24]</sup>。在外部荷载或变形作用下,修复层与原管需协调变形以避免脱粘或开裂。水泥基材料通过弹性模量匹配实现变形协调,高分子材料(聚氨酯、聚脲)则凭借高断裂伸长率,通过弹性变形来吸收和分散应变,从而适应管道局部变形甚至微小开裂,保持内衬完整性。

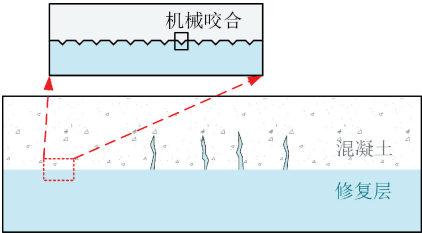


图14 界面黏结机理

Figure 14 Interface bonding mechanism

针对这一机理,前人开展了多种接近实际工况的验证试验。三边承载试验表明,高韧性水泥基材料修复后裂缝与旧管协同发展,体现了新旧材料的整体性。Zhang等<sup>[47]</sup>的原位足尺试验证实,内衬层能显著降低旧管关键部位的环向应变,将复合结构极限承载力提升至高于旧管单独承载的水平。Ha等<sup>[42]</sup>研究发现,即使在钢管接口处已出现明显变形开裂的情况下,其内部的聚脲内衬层仍能保持完整而不破裂,这直接证明了聚脲材料卓越的变形能力和在高应变下的完整性保持能力。

当前针对修复机理中界面黏结的研究仍存在“定性多、定量少”及界面黏结机理不深入的问题。喷筑修复后的管道形成复合结构,其协同承载效果不仅取决于材料性能,更依赖于界面黏结,但现有研究对界面黏结的微观机理及荷载作用下的应力传递规律尚不够透彻。

最后是复合结构增强机理。当修复材料与基体牢固黏结时,二者可形成复合结构共同承担荷载(图15)。内衬层增加了管壁有效厚度,改变了截面刚度与惯性矩,使受到荷载时应力在复合截面中重新分布,刚度较大的旧管首先承力,但随着荷载增加,内衬层开始分担环向应力和弯矩。研究表明,无论是水泥基还是具有一定刚度的环氧内衬,均能降低旧管关键部位应力水平,延迟开裂,提升整体承载能力<sup>[19]</sup>。对于高韧性材料(如ECC或聚脲),其多缝开裂特性或高弹性可分散应力、抑制宏观裂缝产生,并在开裂后继续承载,防止脆性破坏,显著提升

结构安全储备与韧性<sup>[19,42]</sup>。

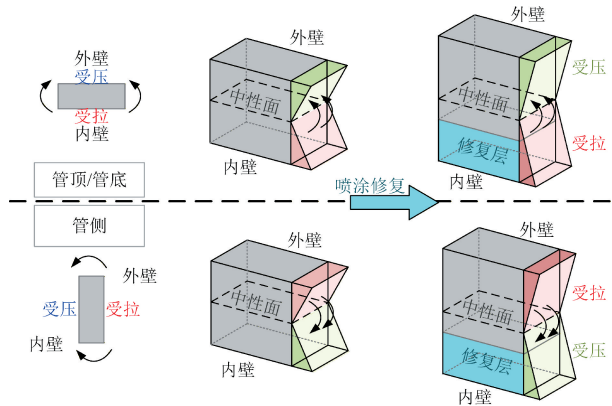


图 15 复合结构增强机理

Figure 15 Reinforcement mechanism of composite structures

对于修复后管道承载力的提升效果验证方面,史国棚等<sup>[48]</sup>发现 100 mm 厚水泥砂浆内衬可使旧管承载力提升 17.2%;Zhu 等<sup>[4]</sup>研究表明,ECC 喷涂材料修复管道极限承载力与 ECC 内衬厚度呈线性正相关。高分子材料的修复厚度往往较小,但仍能提供一定的结构增强效果。Riahi 等<sup>[39]</sup>证实 3 mm、6 mm、12 mm 环氧内衬分别使管道峰值荷载提升 6%、27% 和 40%;Toutanji 等<sup>[49]</sup>发现仅 0.75 mm 厚聚脲涂层可使水泥砂浆试件抗弯强度提升 35%~60%;Zhang 等<sup>[47]</sup>发现聚氨酯材料在不同工况下的修复效率可达 13.45%~53.25%。此外,纳米材料(如碳纳米管、氧化石墨烯)能够通过改善基体在微纳尺度的破坏模式从微观层面上强化高分子材料复合结构的力学性能<sup>[49]</sup>。

复合结构增强的核心在于“既有管道-内衬层”体系的协同受力与荷载分配。需借助典型力学计算模型定量评价。前人已针对复合体系厚度设计开展系统分析<sup>[50]</sup>,修复后管道的协调变形可根据界面应力与界面强度之间的关系进行判断,其判据为

$$KS < R. \quad (1)$$

式中: $K$  为综合安全系数; $S$  为界面荷载; $R$  为界面抗力。若满足该判据,既有管道与内衬层可形成复合结构,此时二者按等效刚度比例分担外荷载;若不满足,则界面失效,二者独立承载。喷筑修复通常能使内衬层与既有管道实现良好黏结,多数情况下符合复合结构协调变形的受力假定。此时外荷载依据各组成部分的刚度进行分配,基于弹性体系假定,将“既有管道-内衬层”视为整体弹性体,并采用平截面假定确保截面变形协调,可推导出弯矩分担关系如下所示:

$$\frac{M_a}{M_b} = \frac{E_a I_a}{E_b I_b}. \quad (2)$$

式中: $M_a$  和  $M_b$  分别为既有管道和内衬分担的弯矩设计值; $E_a$  和  $E_b$  分别为二者的弹性模量; $I_a$  和  $I_b$  分别为二者的截面惯性矩。

基于水平方向应力平衡条件求解受压区高度,再通过力矩平衡推导内衬开裂弯矩,确保内衬在正常使用阶段不发生开裂,进而确定最小厚度如下所示:

$$h_b \geq \sqrt{\frac{6M_b}{\gamma w f_t}}. \quad (3)$$

式中: $h_b$  为内衬厚度; $\gamma$  为截面抵抗矩塑性影响系数; $w$  为内衬计算宽度; $f_t$  为材料轴心抗拉强度设计值。

## 5 结论与展望

原位喷筑内衬修复技术凭借施工灵活、环境影响小、效率高等优势,已成为城市排水管网修复的主流方法。本文系统梳理了管道多因素损伤特征及其对修复材料的性能要求,综述了水泥基与高分子两类喷涂材料的研究进展,对比了二者性能优劣,并总结了相应修复机理。水泥基材料通过纤维增强及超高性能化显著提升了力学与耐久性能;高分子材料则依靠优异的柔韧性、耐腐蚀性和快速固化能力,在防渗防腐和局部补强中发挥关键作用。

然而,该技术在实际应用中仍面临 3 个方面挑战:其一,材料长期耐久性不足,在复杂腐蚀环境中内衬易发生溶蚀与开裂,可能引发管体二次损伤;其二,设计理论与标准尚不完善,水泥基内衬厚度设计缺乏统一方法,高分子材料与基材协同承载机制不明确;其三,施工智能化水平有限,当前仍以人工或半机械化作业为主,制约了修复质量与效率。

展望未来,喷涂修复技术应朝着绿色低碳、智能集成与设计长效可靠的方向发展。在材料开发方面,可尝试以工业废渣替代部分水泥开发低碳胶凝材料,同时引入自修复体系(微胶囊、微生物矿化等),实现损伤自修复,提升材料耐久性,同时研发高亲水黏结型喷筑修复材料,提升潮湿基面的黏结强度。在施工智能化升级方面,针对大直径管道修复,应优化喷涂机器人稳定性控制技术,集成机器视觉监测行走轨迹与喷头姿态,确保内衬层均匀致密。在多性能协同设计理论与规范方面,应整合管道检测机器人获取的病害数据,建立融合界面黏结与荷载分担机制的内衬设计理论,推动形成相应规范,实现从经验到精准设计的跨越。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国城市出版社, 2024.
- [2] Yuan Yiming, Zhang Guangyi, Fang Hongyuan, et al. Influence of microbial community in drainage pipeline on corrosion[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(8): 46-51. [袁艺鸣, 张广毅, 方宏远, 等. 排水管道微生物群落对管道腐蚀的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 46-51.]
- [3] Wang Fuming, He Hang, Fang Hongyuan, et al. Study on mechanical response of the bell-and-spigot joints of pipeline under the coupling of traffic and running load[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(4): 1-6. [王复明, 何航, 方宏远, 等. 交通和运行荷载耦合作用下管道承插口力学响应研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(4): 1-6.]
- [4] Zhu Zihao, Zhang Peng, Ma Baosong, et al. Quantitative model for residual bearing capacity of corroded reinforced concrete pipe based on failure mode[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 129: 104675.
- [5] Wang Fuming, Li Bin, Fang Hongyuan. Experimental and numerical study on polymer grouting repair of underground pipeline with void and corrosion diseases[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(3): 1-8. [王复明, 李斌, 方宏远. 含脱空、腐蚀病害地下管道高聚物注浆修复试验与数值研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(3): 1-8.]
- [6] Xi Dongmin, Lu Hongfang, Zou Xing, et al. Development of trenchless rehabilitation for underground pipelines from an academic perspective[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 144: 105515.
- [7] Xing Wenjing, Zhang Chao, Xia Yangyang, et al. Trenchless rehabilitation materials and technologies for water supply pipes: a comprehensive review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 203: 107896.
- [8] Zhao Yahong, Ma Baosong, Ariaratnam S T, et al. Structural performance of damaged rigid pipe rehabilitated by centrifugal spray on mortar liner[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104117.
- [9] Zhang Xijun, Du Mingrui, Fang Hongyuan, et al. Development of a sprayable PVA-fiber-enhanced cement mortar with high acid-corrosion resistance for pipeline rehabilitate[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 4607-4621.
- [10] Wang Tianyu, Zhang Duo, Zhu He, et al. Durability and self-healing of engineered cementitious composites exposed to simulated sewage environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 129: 104500.
- [11] Li Mingming, Zhao Yunpeng, Liu Kuo, et al. Research status of epoxy resin spraying in water distribution system in China and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(4): 13-15. [李明明, 赵云鹏, 刘阔, 等. 国内外供水管网环氧树脂喷涂修复的研究现状[J]. 中国给水排水, 2016, 32(4): 13-15.]
- [12] Almusallam A A, Khan F M, Dulaijan S U, et al. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4/5): 473-481.
- [13] Capuozzo A, Tenore A, Russo F, et al. A double free boundary problem on microbially induced corrosion in wastewater concrete[J]. Mathematics in Engineering, 2025, 7(4): 481-504.
- [14] Wang Jun, Ying Hao, Fu Hongtao, et al. Field experiment and numerical simulation of the dynamic responses of rigid pipes in soft soil foundations under traffic loading[J]. Structures, 2025, 75: 108739.
- [15] Tang Zeren, Yuan Cheng, Liu Xian, et al. Underground pipeline defect detection and quantification based on 3D vision recognition and segmentation algorithms[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2026, 23(4): 1993-2004. [唐泽人, 袁程, 柳献, 等. 基于三维视觉与分割算法的地下管道损伤检测与量化[J]. 铁道科学与工程学报, 2026, 23(4): 1993-2004.]
- [16] Kong Lijuan, Liang Zengyun, Lu Huan, et al. Accelerated simulating of the deterioration of concrete in gravity sewers[J]. Materials Reports, 2023, 37(7): 74-80. [孔丽娟, 梁增蕴, 鹿桓, 等. 重力污水管道混凝土的加速腐蚀模拟研究[J]. 材料导报, 2023, 37(7): 74-80.]
- [17] Li Bin, Fang Hongyuan, Yang Kangjian, et al. Impact of erosion voids and internal corrosion on concrete pipes under traffic loads[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 130: 104761.
- [18] Zhang Wenyan, Lin Huaxia, Xue Mengfen, et al. Influence of shrinkage reducing admixtures on the performance of cementitious composites: a review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 325: 126579.
- [19] Dong Shun, Wang Dianchang, Hui Erqing, et al. An overview of the application of fiber-reinforced cementitious composites in spray repair of drainage pipes[J]. Buildings, 2023, 13(5): 1119.
- [20] Wang Dehui, Shi Caijun, Wu Zemei, et al. A review on ultra high performance concrete: part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 368-377.
- [21] Justs J, Wyrzykowski M, Bajare D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76: 82-90.
- [22] Ji Jing, Zhang Zhanbin, Lin Manfang, et al. Structural application of engineered cementitious composites (ECC): a state-of-the-art review[J]. Construction and



- Building Materials, 2023, 406: 133289.
- [23] Wang Tianyu. Study on engineered cementitious composites used in trenchless pipeline rehabilitation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022. [王天宇. 非开挖管道修复用 ECC 材料研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.]
- [24] Dawood E T, Ramli M. High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2240–2247.
- [25] Ma Sanjuan, Andrade C, Bentur A, et al. Effect of crack control in mortars containing polypropylene fibers on the corrosion of steel in a cementitious matrix[J]. Materials Journal, 1997, 94(2): 134–141.
- [26] Zhang Xijun, Du Mingrui, Fang Hongyuan, et al. Study on the shear strength and damage constitutive model of the contact surface between PVA fiber-enhanced cement mortar and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132571.
- [27] Yu Kequan, Yu Jiangtao, Dai Jianguo, et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 217–227.
- [28] Sun Guoxing, Liang Rui, Zhang Jinrui, et al. Mechanism of cement paste reinforced by ultra-high molecular weight polyethylene powder and thermotropic liquid crystalline copolyester fiber with enhanced mechanical properties[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 78: 57–62.
- [29] Aydın S, Baradan B. The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 63–69.
- [30] Lai Yangyi, Zhang Qibin, Tang Junwu. Experimental study on influence of polypropylene fiber on fluidity of cement mortar[J]. Sichuan Cement, 2017(3): 12–13. [赖洋羿, 张琦彬, 唐军务. 聚丙烯纤维对水泥砂浆流动度影响试验研究[J]. 四川水泥, 2017(3): 12–13.]
- [31] Pereira E B, Fischer G, Barros J A O. Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of strain hardening cementitious composites (SHCC) [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(6): 834–846.
- [32] Luo Zuyun, Yang Xinhua, Ji Heli, et al. Carbonation model and prediction of polyvinyl alcohol fiber concrete with fiber length and content effects [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2022, 16: 9.
- [33] Kong Yaozu. Study and application of cast in-situ method for pipeline and manhole trenchless rehabilitation [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. [孔耀祖. 原位浇筑法管道和检查井非开挖修复技术研究及应用[D]. 武汉: 中国矿业大学, 2017.]
- [34] Tian Guangshu, Dong Xuewang. Research on cement lining materials using cohesive additive with air blow compressive smearing method [J]. Petroleum Engineering Construction, 1991, 17(3): 27–29. [田广墅, 董学旺. 风送挤涂法聚合物水泥砂浆衬里材料的研制[J]. 石油工程建设, 1991, 17(3): 27–29.]
- [35] Xiang Qian, Xiao Feipeng. Applications of epoxy materials in pavement engineering[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117529.
- [36] Somarathna H M C C, Raman S N, Mohotti D, et al. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: a state-of-the-art review [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 995–1014.
- [37] Shojaei B, Najafi M, Yazdanbakhsh A, et al. A review on the applications of polyurea in the construction industry [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32(8): 2797–2812.
- [38] CJJ/T 210—2014 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S].
- [39] Riahi E, Yu Xinbao, Najafi M, et al. D-load strength of concrete pipes with epoxy linings[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2019, 10(4): 04019030.
- [40] Wang Hailing, Zhang Junwen, Hu Weizheng. Application of polyurethane anticorrosive coating on ductile iron pipe[J]. Foundry Technology, 2020, 41(8): 790–792. [王海玲, 张俊文, 胡卫征. 聚氨酯防腐涂料在球墨铸铁管上的应用[J]. 铸造技术, 2020, 41(8): 790–792.]
- [41] Zhang Ruizhu, Zhang Hao, Cui Xiangcheng, et al. Influence of GO loaded nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the wear resistance of epoxy resin [J]. Materials Protection, 2021, 54(6): 34–39. [张瑞珠, 张豪, 崔祥程, 等. GO 负载纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对环氧树脂耐磨性能的影响[J]. 材料保护, 2021, 54(6): 34–39.]
- [42] Ha S K, Lee H K, Kang I S. Structural behavior and performance of water pipes rehabilitated with a fast-setting polyurea-urethane lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 52: 192–201.
- [43] Deng Chunhua. Preparation and property of HTPB polyurethane elastomer-modified epoxy resin anti-corrosion coatings[D]. Jinan: Shandong University, 2014. [邓春华. 端羟基聚丁二烯聚氨酯改性环氧树脂防腐涂料的制备与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.]
- [44] Song Y S, Youn J R. Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites[J]. Carbon, 2005, 43(7): 1378–1385.
- [45] Kirmani M H, Arias-Monje P J, Kumar S. High interfacial shear strain in polyurea-carbon nanotube composite sheets[J]. ACS Applied Nano Materials, 2019, 2(11): 6849–6857.
- [46] Zhang Rui, Wang Liufang, Zhang Weiguo, et al. Application of high pressure airless spray [J]. Paint & Coatings Industry, 2003, 33(5): 33–35. [张睿, 王留方,

张卫国,等. 高压无空气喷涂的应用[J]. 涂料工业, 2003, 33(5): 33-35. ]

[47] Zhang Xijun, Fang Hongyuan, Shi Mingsheng, et al. Structural performance of corroded concrete pipes after mortar spraying rehabilitation under traffic load[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2022, 128: 104620.

[48] Shi Guopeng, Ma Baosong, Yang Chao, et al. Structural performance of reinforced concrete pipe repaired by cement mortar spraying method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 32-38. [史国棚, 马保松, 杨超, 等. 水泥砂浆喷涂法修复钢筋混凝土管道结构性能[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 32-38. ]

[49] Toutanji H A, Choi H, Wong D, et al. Applying a polyurea coating to high-performance organic cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 1170-1179.

[50] Zhao Yahong, Ma Baosong, Zhang Haifeng, et al. Mechanical behavior and calculation method of interface between host pipeline and lining[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11): 167-174. [赵雅宏, 马保松, 张海丰, 等. 既有管道与内衬叠合界面受力性能及计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 167-174. ]

A Review of In-situ Sprayed Lining Repair Technology for Structural Defects  
in Concrete Drainage Pipeline Networks

DU Mingrui<sup>1,2</sup>, LI Chenguang<sup>1</sup>, YAO Xupei<sup>1</sup>, FANG Hongyuan<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, ZHAO Peng<sup>3</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Laboratory (Henan), Zhengzhou 450046, China; 3. Zhengzhou Anyuan Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** Concrete pipelines in urban underground drainage networks are prone to structural defects such as leakage and cracking under combined chemical-biological corrosion and external loads, posing threats to public safety. Traditional excavation-based repair methods have significant drawbacks, making trenchless in-situ sprayed lining repair technology an important development direction. The damage mechanisms of concrete drainage pipes and the research progress on spray repair materials were reviewed. Firstly, the damage evolution laws under multi-factor actions were analyzed and the performance requirements of repair materials for different types of damage was clarified. Two major categories of spray repair materials, cement-based and polymer-based, were focused on. Cement-based materials, through fiber toughening and microstructure optimization, exhibit excellent performance in structural reinforcement and crack control. Polymer-based materials, with their high elasticity, rapid curing, and superior corrosion resistance, offer unique advantages in seepage prevention and deformation accommodation. Secondly, three key mechanisms, barrier isolation, interface bonding with synergistic deformation, and composite structure enhancement, were further examined, demonstrating that the repair layer restored pipeline integrity and load-bearing capacity through physical isolation, stress redistribution, and overall structural improvement. Finally, considering trends in intelligent repair and green materials, it was proposed that repair materials should evolve toward green, low carbon, self healing materials, intelligent construction upgrading, and multi performance synergistic design theories, providing theoretical support and technical reference for enhancing the long-term safety operational level of urban drainage networks.

**Keywords:** concrete drainage pipeline networks; cement-based materials; polymer-based materials; in-situ sprayed lining; repair theory