

压力管道修复的挑战

Dec Downey Dan D Koo 著 叶之琳 译

摘要：压力管道的修复和非开挖的方法的转变在世界范围内都有大量和公认的需求。原位管道修复技术已经在重力下水道和污水管道上广泛使用四十多年。早期的资料显示原位管道修复技术在1976年首次运用于压力设备。在20世纪80年代，出现聚乙烯管道和折叠形成的塑料管的衬里，以及多种多样增强内衬软管和嵌入式软管的产品，为半结构和全结构衬里提供方法来解决压力管道的修复改造问题。与新开发的重力式管道改造的方法比较，用于压力装置应用的初衬和防蚀涂层采用速度要更加慢一些，这个更高要求的部门设置对工程师来说无疑是个特殊的挑战。本文反映了已建立和出现的压力管道内衬方法，其优势和局限性，以及工程师们在选择、规范和实施方面所面临的挑战。这些挑战包括检查和状态的评估、衬里清洗、安装过程中的维护，产品质量保证、服务恢复和翻新系统的结构设计。

关键词：压力管道、旧管修复、原位管道修复、喷涂法

1 压力管道修复方法的介绍

随着许多发展中国家与发达国家都市化进程的加快和人口的增长，地下压力管道的需求也日益增多。当地下压力管道在历史上不断发展，大量的地下管道系统比如自来水管和天然气管道在结构完整性和公用服务上会存在老化与恶化的问题。一些地下管道系统在运行中没有进行过适当的检查、旧管道的修复和更换已经超过约100年的时间。如图1的所示，钢管道内表层被腐蚀，从而产生红色的水而造成更久远的危害比如腐蚀坑、石墨的发展和泄露。

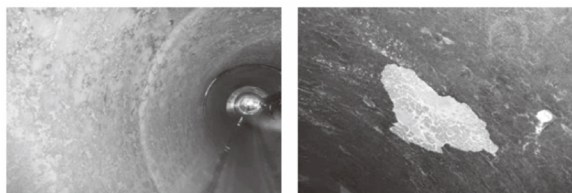


图1 内表面的腐蚀和传输主管保护涂层的腐蚀破坏
(韩国水资源公社)

本文的目的总结为三点：1) 回顾非开挖技术在地下管道中修复技术的历史发展；2) 讨论设计与施工过程中的挑战；3) 提出监管预期。

2 压力管道修复方法的历史进程

直到20世纪70年代原位管道修复技术的发展，压力管道的修复通常意味着修复特定的管道，滑衬解决水流容量的损失或是明挖更换的管道。在1971年由Eric Wood开发的紧密复合式替代的管道，实现了新的和富有挑战性的可能。Insituform Permaline有限公司的公司记录显示，创新的修复方法早在1976年就开始使用，英国雷丁市的泰晤士水务局长为155m的600mm铸铁污水泵送系统。此后，解决了许多污水与工业抽水干线，包括在发电厂处的大量冷却干线。Paltem编织的聚酯软管系统由东京燃气公司和Ashimori工业公司在1980年开发，并于1987年成功地排列了大约1200km长的加压气体管道和水管。与此同时，大阪燃气和大阪波司开发了一种类似的内衬软管产品，该产品在欧洲被授权为凤凰工艺，并且在Sekisui公司收购之前用作气体和水管网的Tubetex和Nordpipe压力管衬管产品取得广泛的成功。随着时间的推移，这些和其他用于压力管道的原位修复产品从具有孔和间隙的粘合软管衬套演变为采用玻璃纤维的增强衬里，凯夫拉和碳纤

维就是来提供增强的爆破强度和潜在的独立耐压性，特别是对于中小直径管道。在1990年，Karl Weiss 推出 Starline 产品，1999年 Sanexen 推出了 Aquapipe 衬管系统。

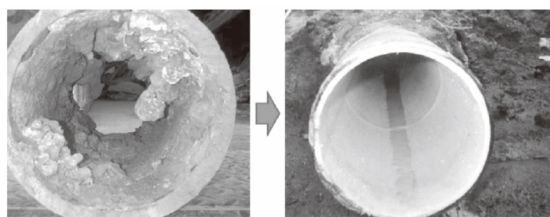


图2 铸铁管的结核和原位修复后水管 (Aquapipe 系统)

英国天然气公司在80年代中期大量参与了管线替换的项目，他们于1987年同DJ Ryan共同推出 Swagelining，这是一个依靠通过模具拉拔 MDPE 管道以减少其外径的工艺，在张力下保持直径减小允许管道被拉入清洁的服务，并且一旦张力减小就膨胀形成紧密配合的衬垫，其能够提供孔和间隙跨越或完全增强的结构，而这些这取决于壁厚与直径 (SDR) 比。Swagelining，尺寸高达 1350mm，已经成功安装超过 1600 公里大约有 2000 年的时间，它目前应用于许多市场海底设施的油管当中。英国天然气公司此时同时也与 Sub Terra 公司合作生产了一种替代性的直径减小技术，Rolldown 的尺寸可达 600mm，包括将 MDPE 管穿过模具，该模具提供了在室温下能够稳定几个星期，甚至几个月的减小直径的插入管，并且需要施加内部水压以使其与原始管道紧密配合接触。Insituform Technologies 的子公司 United Pipeline Systems 开发了 Titeliner，一种类似于 20 世纪 80 年代中期的 Swagelining 的系统，主要用于提供更薄的防腐保护衬里，并取得了巨大的成功。据称，在油田和采矿业已安装了约 25000 公里。Sub Terra，现在 Radius 集团的一部分，在 1992 年引入了支线 (250-1600mm)，并在 1999 年引入了支线圈 (75-250mm)。支线涉及冷弯折 MDPE 管，通常在现场提供交互式或半结构衬管，而支线圈是一种热挤压和工厂折叠式管，可以提供更小直径的完全结构解决方案。Wavin 于 2002 年制造了一种名为 Compact Liner 的具有竞争力的折叠式聚乙烯管，在欧洲、澳大利亚和亚洲包括香港和中国已广泛应用。支线圈和紧密管产品被拉入老

化和劣化的管中并膨胀以使用加压水形成紧密配合的衬里。最近 Insituform Technologies 的母公司 Aegion 公司收购了地下解决方案，开发商 Fusible PVC 管道和小说 Duraliner，一种使用热水在压力下膨胀插入 PVC 储存管道以形成紧密配合的 PVC 衬管的方法。



图3 Swagelining (右) 和 Insituguard- 折叠和形成 (左)

用于翻新压力管的其它方法包括使用插入式的软管和喷涂衬里水泥和聚合物涂层，其中一些被应用于足够厚度的管道，并且能提供跨越压力容纳的孔和间隙。

插入软管 (75-300mm) 的衬里称为 Thermopipe 在 1993 年在英国由 Angus Flexible Pipelines 开创，并在 2000 年被 Insituform Technologies 收购。封装在 PE 中的折叠编织聚酯软管，Thermopipe，被拉入现有管道中，并使用蒸汽和氮气加热和膨胀。专有的端部接头和维修连接将衬管固定到位。刚性衬垫具有良好的拉伸能力和一些抗外部地下水的力量，但可能在空时坍塌。在它的全盛时期，这是一个安装了 3-400 公里的成功产品，但现在已经逐渐的失去人们的支持。最近在市场上，Rädlinger 的 PE 封装 Kevlar 编织布 Primus Line 的尺寸高达 500mm，在欧洲，北美和澳大利亚取得了相当大的成功。Kevlar 的抗拉能力能够使高爆破压力和工作压力额定值高达 55bar。除了上述的改造方法之外，还可以选择包括带有插入管的滑动衬套，其可能在遭受水力的大量损失，特别是在中小直径和管道爆裂的情况下，这种情况通常是可行的，另一英国天然气的赞助使其在早年发展过程中，在天然气和水管道方面取得了相当大的成功。滑移衬里和管道爆裂可能由于现有的检修连接的问题而变得复杂，这些现有的检修连接涉及大量的开放访问以移除和

重新连接侧向检修。然而，这两个过程被广泛使用，并提供多年的检修经验，这些检修可能对于评估恢复期权的“非开挖”的促进者来说是有价值的。

在 20 世纪 30 年代，美国和澳大利亚开发了喷涂衬垫以提供对铸铁和钢管的腐蚀保护，该衬垫便宜且有效，但在小直径水管中显着降低水力能力并且在酸性水中破裂或劣化。在 20 世纪 80 年代，薄的环氧树脂涂层（1-1.5mm）被批准并在英国基本上用于提供防腐蚀，大约 30000kms 被认为已经安装以消除腐蚀的污染（红水）。图 4 显示了在韩国使用环氧涂料喷雾的表面修复的两个步骤。现有的煤焦油环氧树脂衬里约 3mm 厚，并且通过机器人喷砂装置能够完全去除。

表面处理后施加薄环氧树脂层。在 2000 年，由 E Wood & Co 公司开发的聚氨酯涂料可以替代环氧树脂衬里，并且管道在几个小时内能够恢复使用，之后 PU 和聚脲的高密度涂层越来越流行，提供半结构能力来桥接腐蚀孔和泄漏接头。E. Wood 被 3M Corporation 收购，新产品逐渐产生。图 5 显示出了通过使用高速旋转装置将 PU 喷涂在现有的水管上。

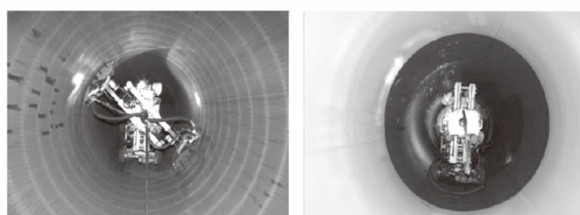


图 4 用于表面喷砂和环氧喷涂（K-water）的自动机器

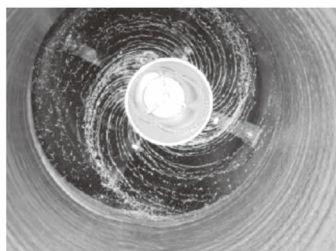


图 5 用聚脲（3M Scotchkote 2400）进行管道复原的半结构或全结构喷涂结构

从该介绍中可以看出，有许多非开挖技术的解决方案可用于修复天然气、水和污水管道。一点不缺少对老化网络的恢复和升级的需求。美国环境保护局（EPA）最近估计需要 2475 亿美元来替换或翻新美国那些泄漏率平均为 20% 老的化和

恶化的水管线。顾问公司 DHI 报告称，由于损失，世界各地的自来水公司每年损失超过 140 亿美元。世界银行建议，水的非税款收入（NRW）应少于所生产水总量的 25%，而在许多国家，NRW 高达 60%。来自欧洲环境局的数据显示，德国的水损失低于 5%，而保加利亚的水损失高达 50% 以上。尽管存在这些挑战，到目前为止，世界各地的水源改造的利用率相对较低，并且安装量通常远远低于需求，并且与地下水道改造形成鲜明对比，地下水道改造不再是专门活动，在许多国家已经成为商品业务。美国每年承担约 4500 公里的地下水道翻新，全世界每年可能接近 10000 公里。

3 压力管道的挑战

翻新重力管线的过程相对简单，广泛实践并且已经得到满足超过 40 年。初步检查和评估可以在低流量时进行，并且流动容易隔离或转向，管道在必要时可以通过喷射和刮擦来清洁，安装衬里，通过机器人切割器重新连接，并且流量可以恢复；一个过程通常需要花费几个小时或几天来翻新最大的管道。它是一个高成本竞争的商业，取决于商品销售广泛可用的材料和许多承包商熟练掌握的日常任务。压力管道整修要求相当高；加压流不易被隔离来用于检查和改造工作，公众更可能需要维持水和气的供应，并在完成后迅速恢复使用。恢复应涉及更严格的测试协议以确认安装质量，或者对水管需要彻底的灭菌。清洁的过程可能需要更彻底，通常需要干净的裸金属基材用于粘合的涂层或衬里，并且在较小压力管道保持液压能力可能需要更初始横截面的完全恢复能力。衬里的过程可以经受更严格的质量控制，以确保涂层的完全硬化或在安装期间避免污染衬里，以及用于压力管更高要求使用寿命的最佳结构特性的开发。这难免会更加耗时和需要更高的要求来恢复服务连接和端部密封件的装配，以实现完全压力紧密系统。因此，这并不奇怪，安装承包商和管道所有者质量管理人员面临更多的征税挑战，压力管道工作需要更高要求的指令系统的能力。

衬里材料的选取对于饮用水管道设备来说是

一个特别的挑战,其中聚合物树脂在工艺中混合和固化,绝对精度对安装产品的质量来说至关重要。这些材料在由 NSF, UK DWI 或 KIWA 等测试机构批准前必须仔细审查,以确保排除可能对人体健康有害的不平衡物或污染物。污染物也是工厂制造的 PE 或 PVC 管材产品用于插入中会存在的问题,机构在制造过程中彻底检查并消除可能在制造过程中引入的任何风险。安装过程本身也经过仔细审查,以排除在工作的这个阶段的风险。这种精度和对细节的注意对成本具有明显的影响,水质的塑料管和聚合物衬里材料比通用管道材料明显更昂贵一些。水质环氧树脂或 PU 衬里材料可能比用于生产和销售更大体积下水道应用的通用树脂贵 3-4 倍。

4 安装的考虑因素

正如上文所述,评估工作,准备工作,清洁,衬里和修复,与压力管道衬板有关的工作基本上较为苛刻,而同时实现市民对迅速恢复服务的期望却非常有限。承包商和管道工作者一起工作,分享知识和技能可能是实现持续成功结果的最佳方式。对管道过去性能的详细了解,对于有效的状况评估和优选的改造技术的选择是至关重要的。关于埋地资产的信息总是难以获得和评估,并且使用 CCTV,声纳,声学 and 电磁工具的全面调查是复杂和耗时的,对于压力管道来说,这也是非常昂贵且具有侵入性的,并且经常会导致服务中断。所有者的记录可以提供泄漏数据,爆破记录,埋藏和土壤的细节,管道样品,腐蚀速率—以确定结构条件和预计寿命所需的许多基本要素。在没有这种信息的情况下,修复方案通常限于离线或在线更换,或者采用完全结构化的解决方案,这排除了在非开挖时代开发的许多改造方法。

在清洗衬里之前清洁方法的选择取决于管道条件,管道材料和衬里工艺的要求。它可以是简单的喷射和冲洗,更高压力喷射以除去结壳,拖动废弃物或清管,除冰,气动聚集清洗或机架进料镗孔。压力管道,特别是那些被预定用于复原的管道,主要是金属管,球墨铸铁或钢,最初选择具有强度性能和维度来保持内部压力和外部载

荷。石棉水泥和钢筋混凝土也很重要,但在过去 30-40 年间,PE 和 PVC 管线已经被越来越多的选择。更传统的材料的特征在于硬的粘附腐蚀产物,并且横截面通常由于腐蚀而受损,这些趋向于需要寻求更积极,耗时和昂贵的清洁方法,废弃和机架进料镗孔。最近在英国和其他地方使用 Ice Pigging 和 Whirlwind Aggregate 清洁方法的经验鼓动人心。这个具有侵略性的方法利用切割和磨损破坏现有的管道结构,并且用完全结构的衬管替换或更新。清洁成本可能是项目进度和总体成本(25-33%)的一个重要因素。诸如环氧树脂和 PU 涂层的修复方法可能需要衬里粘附到管壁上,并且这需要使用侵蚀性方法来恢复到干净和干燥的裸露金属表面,一些聚合物成功地结合到潮湿的基底,但通常是干的和无尘的表面将获得最佳效果。管道配置和工作地点的细节将对所选择的方法有重大影响。喷涂和固化就地管道的方法可以在具有有限占用位置进行操作,例如阀或制造的弯曲部被移除的位置。管道插入方法如 Swagelining, Titeliner 和 RollDown 涉及插入长管的长度,并且可能需要冗长的插入坑和地面上方足够的空间用于焊接管柱和通过变形机械加工。折叠管插入方法如 SubCoil 和 Compact 管可以利用更小的占地面积。通常应避免弯曲,变形的管道环形间隙为 10% 或更多可适应浅的长半径弯曲,但尖锐或制造的弯曲对于插入的管道存在问题,并且在适当位置形成的衬里和涂层,会出现起皱或局部拉伸,可能会存在问题并影响压力控制的能力。

恢复服务是压力管道更新的主要任务,衬里必须在每个连接处和管道端部处具有压力密封,以防止衬里和初始管道之间的泄漏和跟踪。在城市管道中,服务检修系统可能以 5-10m 的间隔连接,这可能是一个巨大的挑战。管端密封件通常是需要小心和精确配合的机械连接件,这很可能相对复杂,其中关于管内部和外部尺寸的信息是粗略的,腐蚀移除和预密封准备是必要的。精确的维修位置和通道的恢复与替代是不可避免的挑战,从 CCTV 调查或建设图纸确定位置可能缺乏准确性,因此迄今为止自动恢复的规模有限并且非常昂贵。从外部接入点进行服务更换通常是一

种可行的选择，其中压力管是浅埋的（0.6–1.5m），并且限制公众对时间和表面的影响。它在未来有望成为一种可选择的方法，并且它适合于局部压力测试，对安装质量可以建立最基本信心。

水源一般需要在修复后进行清洁和灭菌，这可能涉及到空气冲刷、冲洗、擦拭或氯产品的剂量等问题。该过程通常涉及对残余氯的时间依赖性测试，并且在重新投入之前需要长达 48 小时的灭菌。随着恢复到使用时间，由用户和调节器施加的压力，在预氯化的管道衬里后可以适当地进行简短的测试，所述预处理包括可以预期使污染最小化的高温处理。根据供水商和调节器的偏好，用浸泡在浓缩清洁剂中的泡沫塞擦拭是可接受的。

5 用户与监管者的预期

在本文中，我们已经注意到压力管道衬里与地下水道和雨水排水衬里的复杂性，这是需要通过广泛和熟练的实践得出的。显然，压力管的技术需求给他的所有者和承包商带来沉重的负担，以提供用于修复高端管道的压力密封和可维修的衬里。市政拥有者和私有化的公用事业网络的监管者面对公众作为他们提供的服务的最终消费者，自然地，我们都希望我们的管道运行能够令人满意地提供水和电力产品，以维持我们的家庭和企业。尽管许多管道在 50–150 年前安装在与我们现在面临的非常不同的环境中，但是管道业面临着极大的压力，在某些情况下，法定义务迫使他们需要在尽可能短的时间内提供服务。在我们的行业中，我们通常期望一天就能够维修服务，但这是繁重的，并且在开发用于管道和管道更新成本的有效方法中可能是反作用的。我们很多人在生活中更乐于使用瓶装水，可能是由于我们的系

统的老化味道和浊度对水质产生了影响。公用设施业主已经开发了有效的供应替代品，如立管，瓶装水问题，二次供应（旁路）系统，如图 6 所示。重要的是，监管者和媒体平衡地使用这些二次供应的缺点，公用事业及其承包商提供满意的建筑和维修服务，以满足公共卫生和一致的供应目标。

英国水公司于 1990 年私有化，受 OFWAT 的监管。它们涉及的支出主要用于控制泄漏和减少破裂和服务的中断。由于英格兰和威尔士的 35 万公里网络的大约 5 万公里的网络和大量的天然气网络已经通过更换、管道插入和衬里修复，同一天恢复使用和不超 4 小时的服务中断，逐渐达到越来越多的要求并挑战这个行业。毫无疑问，这些压力在世界其他地方能够感觉到。重要的是，在技术得到充分开发和利用之前，这种愿望不会转化为期望，以免我们回到明挖替换并忽视非开挖技术的环境效益。在过去 30 年中取得了巨大进步，非开挖解决方案对环境 and 经济做出了巨大贡献，甚至在未来十年中将取得更大的成就，我们解决水和气体供应相关的压力管道的挑战以及强制污水管道运输。

6 设计注意事项

插入的 PE 和 PVC 管通常基于它们的压力等级设计，而喷涂和固化就地产品的设计取决于使用 ASTM F1216 附录 X1 针对内部压力外部静水压，土壤和活荷载的设计。这是一个针对完全劣化的管道简单的设计，使用经典的薄圆柱壳公式和类似的简单处理的孔和间隙跨度。该公式首先被 Insituform 采用，随后在 ASTM 规范中编纂。用于喷涂这种 3M Scotchkote 2400 的设计方法遵循 ASTM F1216 方法。压力管的设计考虑被认为需要处理峰值压力，真空压力和可能的现象例如疲劳的更复杂的处理，并且应该可能依赖于材料长期的性能特性，例如应力破裂，而不是采用从静态蠕变测试中测得的强度回归因子。更全面的设计程序可以帮助建立对衬里和涂层的压力管性能的信心。在 ASTM F2207 中有一个更复杂的处理，即金属气体管道的 CIPP 内衬规范，但其原理尚未在水利行业使用。



图 6 二次供应（旁路）系统示例

7 新兴的产品

许多用于水和电源整修的衬里产品和方法已经使用超过 20 多年, 各种插入式 PE 管和 CIPP 组合。他们的功能比较好理解。在 CIPP 领域, 大多数压力管产品开发涉及增强型衬管, Sekisui 提供最大达 1200mm 的全结构 Nordipipe 衬管 (Nordipipe 产品经 NSF 批准用于饮用水的装置), Tuetex 交互式的衬管用于废水和工业制造管道。Insituform 提供的 Insitumain 产品额定为 10bar 对直径来说, 内部压力高达 10bar。Reline Europe 和 Impreg 推出了玻璃质高强度的光固化内衬修复产品, 直径达 1800mm, Reline 具有额定压力为 6bar 的特定压力管道产品。Aquapipe 在北美已经安装了近 1000 公里, 并已开始包括在英国进一步销售, 最近在澳大利亚任命了一个许可证持有者。喷涂衬里通常基于英国水工业“红水”计划的开发, 最初涉及用薄 (1-1.5mm) 环氧树脂涂层应用于防腐蚀。大约在 2000 年随着环氧树脂被聚氨酯 (PU) 涂层置换, 随着更快的固化时间和外涂层产生更厚的衬里的可行, 出现了新的时机。在 2010 年之前的 10 年内, 每年大约 1800 公里的 Sub Terra 快速固化内衬和 E Wood Copon 产品安装在英国。3M 于 2007 年收购了约克郡的 E Wood's Copon 产品系列, 这扩大世界范围内喷涂内衬产品的机遇。但进展却不容易, 批准的过程缓慢。在 2012-2013 年, 增强的产品 Scotchkote 2100 和 2400 分别作为防腐蚀涂层和交互式压力防护衬里。迄今为止, Scotchkote 2400 已经广泛应用于约 100 公里。

在英国一种熔化在管道的方法被推出并称为 Aqualiner 已经开发, 并且实现 NSF 和 UKDWI 水认证。它的发展得到了利益相关者的支持, 包括四家英国水公司 (Anglian, Yorkshire, Severn Trent 和 Wessex), Owens Corning 和 NCC Construction: 其股东包括 Toa Grout 工业公司和 Fenner 集团。它在水道和废水管道试验的爆破压力大约达到

50bar, 尺寸在 200-250mm。由聚丙烯和玻璃纤维编织而成的衬管, 拉伸成型, 用热空气融化和按压在主管上来提供一个强大且不可渗透的衬里, 能够提供完全结构的性能。目前在商业发射装置之前进行的过程增强预计在年底之前完成。使用惰性热塑性基体提供了许多机会, 包括焊接连接和凸缘连接。

8 结论

我们能够看出, 许多地下水道翻新的基本技术有潜力并且能广泛应用于更高要求的市场, 例如下水道干线, 水和煤气管道和工业制造管道。实际上, 所描述的许多技术专门用于解决高端管道问题, 并已经成功地打入了初始的市场, 尤其是塑料管插入方法具有 1000s 的安装公里的轨道记录。更广泛的使用取决于成本、技术能力和承包商的经验。用户及其承包商之间的持续合作是至关重要的, 以便这些技术可以帮助公用事业业主在最小的公共中断的情况下, 解决替换埋藏的基础设施的巨大问题, 并且公众在平衡期望方面发挥巨大作用, 使得社会成本和中断都可以得到管理。AWWA 报告的替代时代的黎明 (AWWA 2001) 和不再埋地 (AWWA 2011) 都预示着数千条管道必须更换的时间, 以及他们预期的情况反映在世界各地。我们在未来 5-10 年所面临的挑战将会迅速升级, 所有各方必须努力实现一个共同目标, 那就是健康和卫生标准来维护公众的利益。

参考文献:

- [1] AWWA(2011) “替代时代的黎明: 再投资饮用水基础设施”, 美国水工业协会, Denver, 科罗拉多, 美国。
- [2] AWWA(2011) “不再埋地: 面临美国水基础设施挑战”, 美国水工业协会, Denver, 科罗拉多, 美国。