



DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.20.001

# 给排水管道非开挖 CIPP 修复技术研究综述

向维刚<sup>1</sup>, 马保松<sup>2</sup>, 赵雅宏<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学<武汉> 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082)

**摘要:** CIPP(原位固化法)作为一种重要的非开挖管道修复技术,具有施工速度快、工期短、内衬管与原管道紧密贴合、内衬管连续且表面光滑等优点,被广泛应用于污水管道、供水管道等给水排水管道的修复和更新。在充分调研国内外对该技术的研究基础上,重点介绍了近年来国内外 CIPP 修复技术在弹性稳定性、结构刚度、强度(承载力)及管周土压力等方面的研究情况,指出了目前在 CIPP 设计过程中存在的缺陷及未来的研究方向。简要介绍了我国 CIPP 修复技术的工程实践以及面临的问题与挑战,为进一步研究内衬管的结构受力特性提供参考。

**关键词:** 非开挖修复; 原位固化法; 结构刚度; 弹性稳定性; 管周土压力

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)20-0001-09

## Research Review on Trenchless CIPP Repair Technology in Water Supply and Drainage Pipes

XIANG Wei-gang<sup>1</sup>, MA Bao-song<sup>2</sup>, ZHAO Ya-hong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** As an important trenchless pipeline repair technology, CIPP (Cured-In-Place Pipe) is widely used in the repair and renewal of sewage pipeline, and water supply pipeline and other water supply and drainage pipeline due to its advantages of fast construction speed, short construction period, tight fitting between the lining pipe and the original pipe, continuous lining pipe and smooth surface, etc. Based on a sufficient investigation of domestic and foreign research on CIPP repair technology, this paper reviewed the parameters of CIPP repair technology, including the elastic stability, structural stiffness, strength (bearing capacity) and peripheral earth pressure. This work points out the current defects in CIPP design and future research directions. In conclusion, we briefly introduce the engineering practice of CIPP repair technology in China, as well as the problems and challenges it faces, which could provide reference for further research on the mechanical characteristics of lining pipe.

**Key words:** trenchless repair; CIPP; structural stiffness; elastic stability; peripheral earth pressure

随着我国城镇化进程的不断加快,城市地下管线迅猛发展,近年来,接近使用寿命的给排水管道日益增多,管网老化、渗漏、腐蚀、接口脱节、错口等问题日益突出<sup>[1]</sup>。传统的开挖道路更换修复严重影响城市交通和居民生活,因此非开挖修复技术应运而生。

原位固化法(Cured-In-Place Pipe, CIPP)是目前采用最为广泛的非开挖管道修复技术之一,是指采用翻转或牵拉方式将浸渍树脂的软管置入原有管道内,固化后形成管道内衬的修复方法<sup>[1-2]</sup>。该方法具有施工速度快、工期短、内衬管与原管道紧密贴合、内衬管连续且表面光滑等优点,因此被广泛用于圆形和矩形截面给排水管道的修复和更新。原位固化法需要解决的主要问题包括材料的选择、内衬管的铺设和固化方法以及内衬管设计,使用的主要材料是软管和树脂。按照软管进入原有管道的方式不同,可将CIPP分为翻转式和拉入式两种工艺。软管的固化工艺目前包括:热水固化法、蒸汽固化法和紫外光固化法。内衬管设计主要包括软管直径和长度的确定以及内衬管壁厚设计,分为半结构性修复和结构性修复两种情况考虑。

CIPP技术已经在国内外的城市管网修复更新工程中得到较广泛的应用,但是作为一项高新技术,其基础理论研究不足。在弹性稳定性方面,对于完全劣化的管道,目前的设计方法没有计算外荷载的准则,而是人为判断确定;内衬管临界压力的计算都是基于均匀静水压力,没有考虑到非均匀荷载及原管道破损情况;在结构刚度方面,目前基本上都是通过环向压缩试验结果计算确定,精度不够高,误差较大;在强度方面,给排水管道考虑流体冲击压力、偶尔和周期性波动压力对内衬管力学性能的影响研究不足;在管周土压力方面,结构性修复中,ASTM F 1216—16采用地基反力模量值来表示土体,忽略周围土体管道力学性能的变化,可能会导致设计不安全。

在充分调研国内外CIPP技术的理论研究进展以及国内的工程实践案例后,从弹性稳定性、结构刚度、强度(承载力)及管周土压力4个方面介绍了国内外CIPP修复技术的研究情况,指出了目前该技术在内衬管设计中存在的缺陷,同时,还结合国内的工程案例,分析了该项技术在实际工程中的应用情况以及面临的问题与挑战。

## 1 CIPP管道修复技术的国外动态

### 1.1 内衬管的弹性稳定性

根据ASTM F 1216—16<sup>[3]</sup>标准中规定的CIPP修复技术的具体施工流程,得出了圆形截面管中管的结构,具体见图1。管中管结构一共包含内膜、复合材料、外膜和旧管道4层,复合材料为树脂载体材料或增强材料,包括耐磨层;旧管道为出现问题待修复的污水管道、供水管道、化学及工业管道等压力管道。

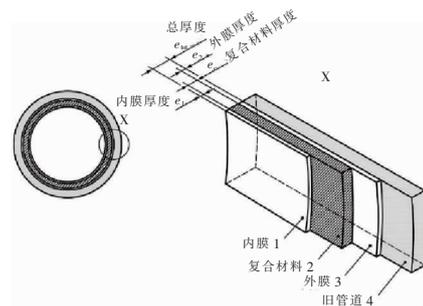


图1 管中管结构示意图

Fig.1 Tube in tube structure diagram

在理想的管中管结构模型中,内衬管与原管道之间紧密贴合,但在修复完成后往往会发现内衬管出现褶皱等屈曲变形。对外压圆柱管的研究可追溯到19世纪中叶,1858年Fairbairn认为管道长度和管径壁厚比是确定屈曲压力的重要参数。1866年Bresse应用小挠度理论,研究了在外部静水压力作用下自由圆环的稳定性,并得出如下表达式:

$$P_{cr} = \frac{3EI}{R^3} \quad (1)$$

式中  $P_{cr}$ ——临界屈曲压力,MPa

$E$ ——弹性模量,MPa

$I$ ——圆环截面的惯性矩, $\text{mm}^4/\text{mm}$

$R$ ——圆环的平均半径,mm

1889年G. H. Bryan利用最小势能原理,对静力外压作用下的长距离管道的屈曲临界荷载进行了相关推导,为了表示无限长管道的平面应变效应,引入了管道的泊松比 $\nu$ 参数。式(1)被修正为:

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D}\right)^3 = \frac{2E}{1-\nu^2} \frac{1}{(\text{SDR}-1)^3} \quad (2)$$

式中  $\nu$ ——泊松比

$t$ ——内衬管平均壁厚,mm

$D$ ——原管道平均内径,mm

SDR—— $D_0/t$ ,  $D_0$ 为CIPP管道平均外径

1971 年 Cheney 利用线性小挠度理论研究了外部均压作用下刚性边界内的圆形圆环的稳定性。在发生屈曲后,屈曲的内衬分为两部分,上部向内屈曲,下部紧靠外刚性壁。在圆环的上半部分( $\theta = \pm \varphi$ ),圆环可以自由地采取与微分方程和边界条件相一致的形状。但是,较低的部分只能在圆周方向上发生偏转;不允许径向偏转。他进一步假设腔壁随着环向内运动,而环抵抗向外运动,但不抵抗向内运动。利用最小势能原理,推导的临界压力方程为:

$$P_{cr} = \frac{(k_{cr}^2 - 1)EI}{R^3} \quad (3)$$

式中  $k_{cr} = 1.57(\frac{R}{i})^{2/5}$ ,  $i$  为回转半径,  $i = \sqrt{I/A}$  ( $A$  为圆环截面面积)。

对于相对较薄的管道( $SDR > 30$ ):

$$P_{cr} = \frac{2.55E}{1-\nu^2} (\frac{t}{D})^{11/5} \quad (4)$$

1977 年 Glock 分析了外静压作用下刚性边界包裹的薄圆环的稳定性问题。Glock 的模型假设环和刚性腔之间没有摩擦,与 Cheney 的模型相似,Glock 设想了两个区域:区域 I 和区域 II,如图 2 所示。但不同的是,Glock 的模型不要求腔壁随环向内移动。

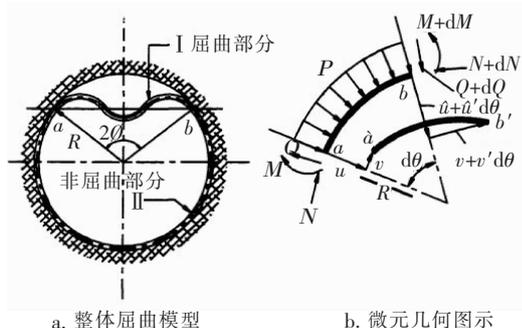


图 2 Glock 的变形几何

Fig. 2 Glock's geometry of deformation

目前安装在部分劣化管道上的 CIPP 的设计方法使用的是 ASTM F 1216—16 中的 X 1.1,具体见下式:

$$P_{cr} = \frac{2KE_L}{1-\nu^2} \frac{1}{(SDR-1)^3} \frac{C}{N} \quad (5)$$

式中  $K$ ——加强系数,通常情况下取 7

$E_L$ ——CIPP 的长期弹性模量,MPa

$C$ ——椭圆度修正系数

$N$ ——安全系数

与式(2)相比,式(5)增加了  $K$ 、 $N$  和  $C$  等参数。

考虑到内衬材料的蠕变效应,式(5)应用长期弹性模量修正了短期弹性模量参数。

$K$  可以解释为由于封闭的既有管道支撑增加了 CIPP 衬垫的屈曲阻力。ASTM F 1216—16 标准推荐的  $K$  最小值为 7。1994 年 Guice 的实验表明,对于不同材质的内衬管道, $K$  值相差较大。 $C$  可以解释为由于既有管道初始缺陷或椭圆化而导致的 CIPP 承载力降低情况,由下式表征:

$$C = [\frac{1-q}{(1+q)^2}]^3 \quad (6)$$

式中  $q$ ——管道的形状变形率

以上所讨论的刚性腔内薄环的临界屈曲压力计算模型,都得到了形式相似的临界屈曲压力计算公式。这些方程的基本形式如下:

$$P_{cr} = \frac{\eta E}{1-\nu^2} \frac{1}{(SDR-1)^\beta} \quad (7)$$

式中  $\eta$ ——系数

$\beta$ ——指数

以上内衬管稳定性分析模型只适用于局部劣化管道,即仅适用于半结构性修复设计。而对于全部劣化管道,即结构性修复设计,ASTM F 1216—16 中介绍了目前安装在完全劣化的主管道中的 CIPP 的设计方法,计算方程为:

$$q_t = \frac{1}{N} [32R_w B' E_s' C (\frac{E_L I}{D^3})]^{1/2} \quad (8)$$

式中  $q_t$ ——管道总外部压力,MPa

$R_w$ ——水浮力系数

$B'$ ——弹性支撑系数

$E_s'$ ——土壤反应模量,MPa

## 1.2 内衬管的结构刚度

在 *Structural Mechanics of Buried Pipes* (3rd ed.)<sup>[4]</sup> 一书中,结构刚度被定义为抵抗挠曲变形的能力,在数值上等于应力-应变图上任意点处的斜率  $F/\Delta$ 。

McAlpine G<sup>[5]</sup> 通过犹他州立大学(USU)在大型土壤槽中对 750 mm 有裂缝的无钢筋混凝土管道的测试,发现管道周围土壤的支撑能力(即土壤的坚硬程度)直接影响着开裂刚性管道的有效刚度。在坚硬的土壤中,管-土结构的有效刚度非常高,安装内衬管可以通过防止土壤冲进管道造成土壤空隙来保持土壤的支撑。在较软的土壤中,柔性内衬管可以提高开裂混凝土管道的刚度,为开裂混凝土管道的内衬设计奠定了基础。

Mogielski 等<sup>[6]</sup>利用对比法对无内衬管和有内衬管的5种类型管道样品进行了环刚度试验。结果表明,带内衬管的管材的环刚度变化与管材和内衬的结合强度呈正相关,内管壁越粗糙,黏接能力越强。为了满足经济性和耐久性的设计理念,还需要进一步研究环刚度的增加与粗糙度和内衬管厚度之间的定量关系。通过建模计算得出的内衬减薄系数可平衡三者之间的影响,已被广泛应用到内衬管厚度的设计方法中。

Brown 等<sup>[7]</sup>利用三维有限元建模的方法,分析了极限状态下 CIPP 内衬管的结构刚度对拉应力的影响。发现在最大工作压力下,内衬管的拉应力实际上由无侧限的周向应力控制。环向刚度的增加在一定范围内可以降低内衬管在工作状态下的拉应力,如果内衬管根据这种极限状态设计,则环向模量应至少是轴向模量的 1.1 倍,以最小化内衬管的最大拉应力。

Czel 等<sup>[8]</sup>提出了一种根据环向压缩试验结果确定纤维缠绕的椭圆形聚合物内衬管环向有效弹性模量的新方法。该方法也可用于质量控制和一般产品控制,适用于各种管道截面。设计工程师可以通过该方法从任意椭圆形截面上的环的简单压缩试验结果中,计算出各种管材的有效弹性模量,弹性模量的值越大,内衬管的刚度也越大。

### 1.3 内衬管的强度(承载力)

Ampiah 等<sup>[9]</sup>对比分析了铸铁水管内安装树脂浸渍毡管时出现的褶皱对内衬管强度的影响。从加拿大一个施工现场取得3组常见的褶皱内衬管,采用基于裂片测试的方法,通过与无褶皱的内衬管进行对比分析,发现出现褶皱的地方是内衬管强度最低的地方,内衬管的失效破坏从此处开始;褶皱的形态和尺寸对内衬管的第一次开裂时所能承受的载荷有显著影响,而对内衬管的最终承载能力的影响比对第一次开裂荷载小。对于其他管材的圆形或椭圆形截面管道,同样存在相同的规律。因此,在内衬管的设计及安装过程中应该使内衬管与原管道紧密贴合,防止褶皱的出现影响整个系统的强度。

内衬管的设计应该充分考虑到安装过程中常常出现一些质量问题, Sterling 等<sup>[10]</sup>基于美国相应的 ASTM 测试标准,对取自北美 11 个城市的 25 个不同使用年限的修复重力式污水管道的 CIPP 内衬管样品进行了抗拉强度、抗弯强度等性能测试。测试

结果发现,在内衬管的安装过程中存在一些质量问题,比如:内衬管与主管之间未能完全紧密贴合,内衬管的厚度未达到设计要求的厚度,这些都影响内衬管的强度和寿命,因此,合理设计和安装 CIPP 内衬管可以使其使用寿命最大化。

输水管道运营过程中的冲击压力是工作压力的 2~3 倍,因此在进行该类管道的内衬设计时,需要考虑的内部压力应该包含工作压力、周期性和偶尔的波动压力。为了更好地了解 CIPP 内衬管对冲击压力和周期性波动压力的响应,滑铁卢大学建设的新的衬垫压力测试设施可用于 CIPP 内衬管短期和长期爆破试验等,推动了 CIPP 压力内衬管设计的发展。

### 1.4 管周土压力

埋地管根据其结构性能通常分为刚性管和柔性管两种。一般来说,埋地管支撑的能力来自两个方面:首先,埋地管承受外部荷载的固有强度;其次,埋地管两侧土壤的侧压力。侧向压力在管道环内产生的应力与垂直荷载产生的应力方向相反,从而帮助管道承受垂直荷载。

埋地管道周围土压力的大小与土体条件、埋管深度和管土相互作用等因素有关,在管土相互作用方面,1965 年 Lusche 讨论了在高荷载作用下埋地圆柱管与周围土体的相互作用。通过区分压力重分布、变形约束和拱起 3 种作用类型,可以最有效地分析相互作用现象。在系统变形较小的情况下,作用在管壁上的压力高度不均匀。当荷载增加时,原来的圆管变形成近似水平椭圆的形状,并在这一过程中调动了侧向被动土压力。很快,任何压力的增加都将以这样一种方式分布在管道周围,从而在管道中造成纯环压。基于这一环压缩理论的分析,发现只要合理地设计和施工管-土系统,通过压力重分布实现管周围压力的平衡是安全可靠的,且系统的失效将由管的压缩屈服引起。据此, Lusche 对管-土系统的分析和设计提出了改进建议。

1964 年 Burns 等认识到 Marston/Spangler 方法的缺点,并提出解决方案,以适用于弹性、埋深大的圆柱形管道,它被包裹在各向同性、均匀的无限弹性介质中,压力均匀分布在远离管道的水平面上。并提出了黏结和非黏结两种土-管界面条件的求解方法。在黏结界面的情况下,假定剪切应力和径向应力在管道与周围连续介质的界面上传递。对于无黏

结界面,土与管道之间的界面不传递剪应力。建立了黏结和非黏结两种相互作用情况下径向压力、管道径向挠度、弯矩和推力的方程。

1983 年 Matyas 通过悬浮管道模型试验结果,计算得出了非屈服水平刚性管在沉降回填作用下所受的竖向土荷载。该计算方法得到的结果比实际竖向土荷载小,而根据试验结果曲线拟合得到的曲线方程可以很好地估算竖向土荷载。

对于埋地柔性管,周围土体显著提高了管的屈曲强度。仅通过无支撑结构的室内试验,无法确定埋地管的屈曲强度。在现场单独测试每一个结构也是不可行的。因此,需要建立理论模型来量化埋地柔性管的屈曲行为。

Spasojevic 等<sup>[11]</sup>通过建立物理模型试验,以 CIPP 为例研究了土体荷载对大口径、密闭、无黏结、柔性的排水管道的影响。主管与周围土体的相互作

用强烈影响着土体荷载向 CIPP 管道的传递,在土体荷载的长期作用下,管-土结构会变形并与内衬相互作用。

此外,在管道系统运营过程中,地面荷载(如交通荷载等)通过影响管土相互作用,进而影响整个系统的稳定性,因此,合理的内衬管设计和安装还应该考虑到交通荷载等地面荷载的影响。

## 2 国内 CIPP 管道修复技术工程实践

随着我国城市管网的迅猛发展,已建成多年的城市地下管线开始出现渗漏、腐蚀、坍塌等问题,由于城市的建筑交通等设施密集,开挖修复对交通和居民生活造成的影响较大,因此,非开挖管道修复技术备受青睐。

近年来,CIPP 管道修复技术在管网修复领域应用越来越广泛。表 1 列出了我国部分 CIPP 管道修复技术的成功案例<sup>[12-14]</sup>。

表 1 我国 CIPP 管道修复技术成功案例

Tab. 1 Successful cases of CIPP pipeline repair technology in China

名称	管材	管道类型	管径/mm	修复长度/m	修复方法
成都市金牛区星河路	钢筋混凝土管	污水管道	D400	23	紫外光固化
成都市蜀都大道	高密度聚乙烯管	污水管道	DN600	33.5	紫外光固化
北京海淀区学知桥	钢筋混凝土管	污水管道	D1 200	80	紫外光固化
			D1 250	100.2	紫外光固化
			D1 500	58	紫外光固化
成都市武都路	钢筋混凝土管	污水管道	D600	1 149	紫外光固化
成都市大安西路	钢筋混凝土管	污水管道	D700	641	紫外光固化
成都市大安中东路	钢筋混凝土管	污水管道	D800	1 152	紫外光固化
成都市华星路	钢筋混凝土管	污水管道	D1 000	1 096	紫外光固化
山东临沂青龙河	钢筋混凝土管	污水管道	DN1 200	1 985.2	紫外光固化
天津市某新建产业园区	钢筋混凝土管	污水管道	D300 ~ 700	605	蒸汽固化
天津开发区泰丰路	钢筋混凝土管	污水管道	DN800	—	蒸汽固化
济南市趵突泉公园	钢筋混凝土管	污水管道	DN600	160	热水固化

使用年限过长的老旧管道出现的问题一般比较复杂,包括淤堵、渗漏、腐蚀、坍塌等问题中的几种,需要先采取预处理措施才能进行 CIPP 修复。以成都市金牛区星河路 D400 mm 污水管线修复工程为例,现场管线受下游塌陷影响,上游管线淤堵,管线腐蚀严重且塌点较长。经过多次计算和研讨,最后将此工程分塌点处理、清淤和紫外光固化内衬修复 3 个阶段进行,修复后管道材料的强度、耐腐蚀性、力学性能远高于同管径混凝土管,彻底解决了此段管线排水问题。该管段修复前、后的管道效果如图 3 所示。



a. 修复前  
b. 修复后  
图 3 修复前与修复后的管道对比

Fig. 3 Comparison of pipeline situation before and after repair

在国内 CIPP 修复工艺中内衬管根据《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210—2014)中规定的计算公式进行壁厚计算。以成都市武都路、大安西路、大安东路、大安中路、华星路的污水管道修复工程的内衬管设计为例,通过检测发现现有管道受到严重腐蚀,因此按照结构性修复的计算公式进行壁厚计算。紫外光固化工艺为原位固化法中的一种工艺,其所用内衬管材料主要为玻璃纤维增强树脂基材料,根据《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210—2014)中的规定,其短期力学性能的最小要求应满足表 2 中的要求。其中材料力学性能按照最小要求值(见表 2、3)中的材料性能作为临界点计算壁厚。对于弹性模量处于临界点之间的材料,壁厚按照较低临界点计算的壁厚选取。其他参数按表 4 选取,临界点材料壁厚计算结果见表 5。

表 2 玻璃纤维增强树脂基材料短期力学性能要求  
Tab. 2 Short term mechanical properties of glass fiber reinforced resin-based materials MPa

项目	数值	测试标准
弯曲强度	>45	《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》(GB/T 1449—2005)
弯曲模量	>6 500	《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》(GB/T 1449—2005)
抗拉强度	>62	《塑料 拉伸性能的测定 第 4 部分:各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件》(GB/T 1040. 4—2006)

注: 抗拉强度只对压力管道有要求。

表 3 常用光固化内衬材料力学性能  
Tab. 3 Mechanical properties of common light curing lining material MPa

短期弯曲模量	长期弯曲模量	短期弯曲强度	长期弯曲强度
14 800	9 870	300	210
10 500	7 350	250	150

表 4 内衬管壁厚计算其他参数

Tab. 4 Other parameters of the lining thickness calculation

项目	管顶水位/m	原有管道支撑系数	安全系数	管顶覆土厚度/m	原有管道椭圆度/%	内衬管泊松比	管侧土综合模量/MPa	填土重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
数值	0.5	7	2	4~4.4	2	0.3	6.8	17

注: 管径 600 mm 覆土 4.4 m,管径 700 mm 覆土 4.3 m,管径 800 mm 覆土 4.2 m,管径 1 000 mm 覆土 4 m。

表 5 临界点材料壁厚计算值

Tab. 5 Calculated value of critical point material wall thickness mm

管径	壁厚		
	弯曲模量 14 800 MPa	弯曲模量 10 500 MPa	弯曲模量 6 500 MPa
600	5.2	5.7	6.7
700	6.0	6.6	7.8
800	6.8	7.5	8.8
1 000	8.3	9.2	10.8

最终本工程内衬管壁厚设计值应满足大于或等于表 5 中的临界点材料壁厚值即可。

随着 CIPP 管道修复技术的不断推广与发展,该项技术在修复管道管径、管长及修复厚度等方面都取得了一定的突破。以北京市海淀区学知桥南的管线修复工程为例,该工程由 3 段组成,管径为 D1 200~1 500 mm。3 段管线腐蚀严重且地上有一座高架桥,采用紫外光固化内衬全结构修复,修复总长约 240 m,修复厚度 13~15 mm,成功实现了 CIPP 修复技术在大管径、大厚度、大长度方面的突破,这在国内外都属于罕见工程案例。

在利用原位固化法修复排水管道中,树脂的固化方式除了紫外光固化,还有热水固化和蒸汽固化。如济南市趵突泉公园污水管道渗漏严重,采用热水固化树脂的内衬法进行修复,修复后管道严密性得到增强,大大增强了承压、耐腐蚀、抗渗能力。热水固化法是内衬法修复使用最早的一种方法,它使得长距离、大直径管道的内衬法修复成为可能。而天津市某新建产业园区道路和天津开发区泰丰路污水管道的修复采用的都是蒸汽固化树脂法,修复后管道的渗漏问题得到彻底解决。蒸汽固化法的主要优点是固化速度快,可应用于高差 < 60 m 的大斜度污水管道修复。

CIPP 管道修复技术在我国还处于起步阶段,目前已有许多采用 CIPP 技术修复排水管道的工程案例。但是,相关理论的研究非常有限。舒彪等<sup>[15]</sup>总结了 CIPP 技术在施工中常见的质量问题,包括针孔、缺口、起皱、开裂等,并分析了问题产生的原因,提出了一些解决方案。周律等<sup>[16]</sup>以广州市中心城区 DN300~DN800 的地下排水管道非开挖修复为例,采用层次分析法,综合考虑施工条件、费用、效益

等因素,对比分析了螺旋缠绕法、原位固化法和穿插法 3 种方法的适用性。孙跃平<sup>[17]</sup>分析了 CIPP 内衬制管的构造设计和性能指标,在 CIPP 修复排水管道后,管道的结构以双层构造管为主,即旧管道承受地面荷载,内衬管承受地下水压。性能指标包括承载能力、耐腐蚀和耐磨损性能、水密性能。

依据《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210—2014),内衬管设计没有考虑原管道的部分缺陷,包括褶皱、环状间隙等对圆周支撑系数的影响。安关峰等<sup>[18]</sup>对这一问题进行了深入研究,针对不同公式分别采用工程案例计算了 CIPP 内衬的壁厚,并据此提出了优化的 CIPP 内衬外压屈曲设计方法。

在排水管道采用 CIPP 修复后的质量验收方面,遆仲森等<sup>[19]</sup>对比分析了现场取样和室内铸样的力学性能测试结果,发现测试结果相差较大,因此,在管道原位固化法修复内衬管质量验收中,建议对内衬管进行现场取样检测。

李兆超<sup>[20]</sup>用最小势能原理和薄壳理论,在平面应变状态下,推导出了不均匀厚度的柔性衬砌在均匀外压下的临界弹性屈曲压力的解析公式,并利用 ABAQUS 进行了有限元模拟,验证了公式的正确性。

在充分引进国外先进材料和技术工法并且不断吸取经验的基础上,我国 CIPP 管道修复技术日渐成熟,紫外光固化内衬修复技术已逐渐成为排水管道非开挖修复的主流技术,在修复大长度、大管径病害复杂的管道方面都取得了突破,但是与国外相比在内衬管设计理论研究、修复长度、技术设备等方面仍然存在一定的差距,内衬管设计理论研究基本上都是在国外研究的基础上进行的。

### 3 CIPP 管道修复技术的未来与挑战

根据原管道的破损情况,将其分为局部劣化和完全劣化两种类型。对于局部劣化的圆形管道,通过几种模型的相互对比,发现 Glock 模型的边际误差最小。1984 年 Aggarwal 和 Cooper 对内衬进行了外部压力测试。在试验中,衬管被安装到钢管中,在衬管和套管之间施加压力,并以约为预期失效压力的 1/10 的幅度逐渐递增,直至失效。观察内部,以确定何时发生膨胀。结果表明,试验失稳压力远大于由方程求得的理论失稳压力。衬管的抗屈曲能力在既有管道的约束作用下得到了显著增强。

对于局部劣化的椭圆形管道,Guice 将 18 个不

同椭圆度的 CIPP 试样置于椭圆形钢管中进行测试,其中 6 根在不同椭圆度水平(5%、10%和 20%)下测试,现场实践中椭圆度在 10%左右波动。在试验过程中,只观察到屈曲破坏模式。在外力作用下,由于内衬管失稳而产生屈曲破坏。这种类型的破坏总是通过伴随的嘎吱声来识别,这表明了屈曲破坏的开始。在椭圆度为 5%和 20%的案例中,屈曲失效模式均为单波屈曲模式。分析表明,ASTM F 1216—16 低估了椭圆形既有管道中修复的 CIPP 衬管结构的屈曲压力。在椭圆度为 5%的情况下,实际的屈曲压力被低估约 44%;在椭圆度为 10%的情况下,实际的屈曲压力被低估约 45%;在椭圆度为 20%的情况下,实际的屈曲压力被低估约 56%。由于屈曲压力被低估,因此从设计角度来看,这种分析偏保守。

对于完全劣化的管道,ASTM F 1216—16 中介绍了目前安装在完全劣化的主管道中的 CIPP 的设计方法。在 AWWA 方程中增加了椭圆度和安全系数[见式(8)]。AWWA 方程是 Lusher 提出的用于预测埋地屈曲压力方程的修正方程。

ASTM F 1216—16 对于安装在完全劣化管道上 CIPP 设计的主要缺点是:①没有计算外载荷的准则,而是取决于设计者的判断;②该方法利用地基土反力模量来表示周围土体,而地基土反力模量很难准确获得;③该程序将管道屈曲破坏作为唯一的设计准则,忽略了其他预期的破坏准则。

纵观国内外有关 CIPP 管道修复技术的科研成果与工程实践,该项技术在非开挖管线修复领域占据比较重要的地位,以其新旧管道紧密贴合、无需灌浆、施工速度快、工期短、内表面光滑等优点被广泛应用于污水管道的修复。随着管线问题的日益突出及可持续发展理论的提出,这都给 CIPP 修复技术提出了更高的要求,致使该项技术面临以下几方面的挑战:

① CIPP 管道修复领域的相关标准还需要进一步细化和完善,在《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)中将结构性缺陷程度划分为 4 个等级,其中 II、III 等级的修复工艺需要进一步补充;

② 未来用于 CIPP 管道修复的更加耐腐蚀、高承载力、更环保的内衬管新复合材料的研发,将进一步增加修复之后管道的使用寿命,进而推动 CIPP 技

术的发展;

③ 相关理论有待更加全面的研究,内衬管屈曲的设计研究应该不仅仅假定周围是均匀的静水压力,应该更多地结合工程实际,研究非均匀荷载的计算模型,并且要考虑原管道的破损情况;

④ 未来地下空间建筑信息模型(BIM)的建立,为管道修复设计、施工、质量评估等提供了更加详细完备的资料。同时,也能为保证管道修复工程的安全性、适用性和耐久性奠定基础。

#### 4 结语

通过对国内外 CIPP 管道修复技术的回顾,得到了如下结论:

① 局部劣化圆形管道。与其他分析模型相比,Glock 模型的边际误差最小;ASTM F 1216—16 中方程 X1.1 与实验结果有较大偏差,建议的加强系数  $K$  在不同产品之间存在显著差异。

② 局部劣化椭圆形管道。试验过程中只观察到屈曲的破坏模式。然而,屈曲并不是 CIPP 的唯一失效形式。路易斯安那理工大学实验研究发现了另一种失效模式(内衬管壁的分裂),造成这种失效的真正原因还不清楚。因此,今后应集中于研究其他可能的失效模式,还需要确定这些失效模式是在什么条件下开始的。随着管道椭圆度的增大,管道的屈曲压力不断减小。ASTM F 1216—16 中方程 X1.1 低估了所有测试的椭圆度的屈曲压力。需要进一步的实验和分析研究来验证所提出的模型,并验证考虑本研究未包括的参数的 CIPP 系统的行为,如:a. 其他几何形状或 SDR 值的影响效果;b. CIPP 材料随时间的黏弹性(蠕变)行为;c. 其他类型的既有管道异常的影响;d. CIPP 衬管和既有管道之间的间隙对结果的影响。

③ 完全劣化管道。由于劣化的管道大多是漏水管道,管道周围细小颗粒的移动造成了管道的空隙,改变了管道周围区域的机械性能。因此,ASTM F 1216—16 对于安装在完全劣化的管道上的 CIPP 设计中用一个地基反力模量值来表示土体,忽略了周围土体管道力学性能的变化,可能会导致设计不安全。需要另一种方法来考虑管道周围土壤和整个土壤介质之间的力学性能差异。

总的来说,CIPP 内衬管的设计规范中还缺乏计算完全劣化管道外荷载的准则,并且在考虑管土相互作用时,利用地基反力模量值表示土体,忽略了

周围土体管道力学性能的变化。而对于局部劣化管道,不止屈曲一种失效模式,且在研究内衬管屈曲稳定性时基本上都假设其承载均匀静水压力,缺乏非均匀荷载状态下的研究,未来应该研究其他可能出现的失效模式以及失效的原因。

#### 参考文献:

- [1] 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.  
Ma Baosong. Trenchless Pipeline Rehabilitation and Renewal Technology [M]. Beijing: People's Communications Press,2014(in Chinese).
- [2] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京:人民交通出版社,2008.  
Ma Baosong. The Science of Trenchless Engineering [M]. Beijing:People's Communications Press,2008(in Chinese).
- [3] ASTM F 1216 - 16, Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube[S]. USA: ASTM International,2016.
- [4] Watkins R K, Anderson L R. Structural Mechanics of Buried Pipes[M]. 3rd ed. USA: CRC Press,1999.
- [5] Mcalpine G. Rehabilitation of fully deteriorated rigid pipes by flexible and rigid liners[A]. The Proceedings of Pipelines Division Specialty Conference 2001 [C]. USA: ASCE,2001.
- [6] Mogielski K A, Kuliczkowski A, Kuliczowska E. Change in toughness parameters of sewer pipes rehabilitated with two types of epoxy cipp liners[J]. J Pipeline Syst Eng Pract,2017,8(4):04017015.
- [7] Brown M J P, Moore I D, Fam A. Performance of a cured-in-place pressure pipe liner passing through a pipe section without structural integrity[J]. Tunn Undergr Space Technol,2014,42:87-95.
- [8] Czel G, Takacs D. Determination of hoop direction effective elastic moduli of non-circular profile, fiber reinforced polymer composite sewer liner pipes from lateral ring compression tests[J]. Int J Pres Ves Pip, 2015,134:46-55.
- [9] Ampiah N, Fam A, Moore I D. Wavy imperfections and the strength of cast-in-place pressure pipe liners[A]. The Proceedings of International Pipelines Conference 2008[C]. DOI:10.1061/40994(321)54,2008.
- [10] Sterling R L, Shaurav A, Allouche E N, et al. Studying

- the life-cycle performance of gravity sewer rehabilitation liners in North America [J]. *Procedia Eng*, 2016, 165: 251 – 258.
- [11] Spasojevic A D, Mair R J, Gumbel J E. Centrifuge modeling of the effects of soil loading on flexible sewer liners [J]. *Géotechnique*, 2007, 57(4): 331 – 341.
- [12] 段宽, 史志利, 庞梅. 浅谈埋地排水管道非开挖修复技术与工程应用 [J]. *特种结构*, 2016, 33(1): 109 – 114.
- Duan Kuan, Shi Zhili, Pang Mei. Discussion on non-excavation repair technology and engineering applications of underground drainage pipeline [J]. *Special Structures*, 2016, 33(1): 109 – 114 (in Chinese).
- [13] 吕喜正. 天津开发区排水管道非开挖内衬修复工艺的选型 [J]. *管道技术与设备*, 2012(2): 40 – 42.
- Lü Xizheng. Process selection of the trenchless lining rehabilitation of drainage pipelines in TEDA [J]. *Pipeline Technology and Equipment*, 2012(2): 40 – 42 (in Chinese).
- [14] 姜向东, 张会, 刘海军, 等. CIPP 翻转内衬工艺用于污水管道功能性修复 [J]. *中国给水排水*, 2012, 28(14): 106 – 108.
- Jiang Xiangdong, Zhang Hui, Liu Haijun, *et al.* Application of CIPP lining technology to functional rehabilitation of sewers [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(14): 106 – 108 (in Chinese).
- [15] 舒彪, 马保松, 陈宁宁. CIPP 管道修复工程质量控制 [J]. *非开挖技术*, 2010(1): 98 – 101.
- Shu Biao, Ma Baosong, Chen Ningning. Quality control of CIPP pipeline rehabilitation project [J]. *China Trenchless Technology*, 2010(1): 98 – 101 (in Chinese).
- [16] 周律, 赵巨尧, 羊小玉, 等. 采用层次分析法对排水管道非开挖修复技术优选研究 [J]. *给水排水*, 2015, 41(3): 94 – 97.
- Zhou Lü, Zhao Juyao, Yang Xiaoyu, *et al.* Analytic hierarchy process to select the optimal technique for trenchless sewer pipeline rehabilitation engineering [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(3): 94 – 97 (in Chinese).
- [17] 孙跃平. 管道非开挖修复技术的分类和设计 [J]. *中国给水排水*, 2005, 21(9): 37 – 39.
- Sun Yueping. Classification and design of trenchless technology for pipe rehabilitation [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(9): 37 – 39 (in Chinese).
- [18] 安关峰, 刘添俊, 梁豪, 等. 排水管道非开挖原位固化法修复内衬优化设计 [J]. *地质科技情报*, 2016, 35(2): 1 – 4, 9.
- An Guanfeng, Liu Tianjun, Liang Hao, *et al.* Optimal design of the cured-in-place pipe lining for trenchless rehabilitation of drainage pipelines [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(2): 1 – 4, 9 (in Chinese).
- [19] 遆仲森, 马保松, 舒彪, 等. 排水管道原位固化法修复内衬管的施工质量验收研究 [J]. *给水排水*, 2012, 48(1): 93 – 96.
- Ti Zhongsen, Ma Baosong, Shu Biao, *et al.* Research on construction quality test of the drainage pipe lining tube rehabilitation by cured-in-place pipe [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 48(1): 93 – 96 (in Chinese).
- [20] 李兆超. 地下管道屈曲稳定研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Li Zhaochao. Buckling Stability of Underground Pipelines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese).



作者简介: 向维刚 (1997 – ), 男, 湖北利川人, 硕士研究生, 研究方向为非开挖管道修复理论与技术。

E-mail: 1280357503@qq.com

收稿日期: 2020 – 06 – 11