



# 管道原位修复无纺布软管接缝力学性能研究

曹井国<sup>1,2</sup> 张文宁<sup>1</sup> 石东优<sup>1</sup> 高留意<sup>1</sup> 杨宗政<sup>1</sup>

(1 天津科技大学化工与材料学院,天津 300457; 2 天津水工业工程设备有限公司,天津 300070)

**摘要** 管道的原位固化修复,是通过气压或者水压的作用,将浸有树脂的软管翻转或拉入,内衬于管道内侧,采用加热方式固化。在修复施工过程中,由于水压或者气压的作用,软管要承受比较复杂的应力及应变。而由于软管接缝与主体材料力学性能存在一定的差异,容易成为施工的薄弱环节,需要对接缝进行研究。采用双侧热复合方式,考察不同复合温度对软管接缝的力学性能影响。结果表明:在固定压力为 0.1MPa、热复合距离为 2mm、行进速度为 2.4m/min 情况下,内、外接缝最佳热复合温度分别为 340℃和 380℃,抗拉强度分别可达 9.3MPa 和 28MPa;双侧复合接缝力学性能优于单侧复合。通过耐热研究发现使用温度在 20~100℃范围时,内外接缝抗拉强度均存在不同程度的衰减,衰减幅度分别为 81%和 83%。

**关键词** 管道修复 无纺布软管 接缝力学性能 抗拉强度 剥离强力

中图分类号:TU81

文献标识码:A

文章编号:1002-8471(2019)-0283-04

DOI:10.13789/j.cnki.wwel964.2019.S1.86

## 0 前言

截至 2017 年底,我国城市排水渠长度总量达到 58 万 km<sup>[1]</sup>,且以每年 7%的速率增长,由于管道的使用寿命通常为 30~50 年,铺设年代久远的管道相继达到服务年限。自非开挖技术引进我国之后经过不断的发展,此技术在国内普遍推广,并逐渐成熟。原位固化修复技术是目前管道非开挖修复的主要技术之一。该技术采用树脂浸渍软管,通过翻衬或拉入修复技术将其衬于受损管道的内部,固化后以“管中管”的形式实现对受损管道的修复<sup>[2]</sup>。

无纺布软管属于管状非织造布复合材料,是管道修复中使用较多的产品之一,无纺布软管在制作时,先以非织造布为骨架,均匀涂覆防渗膜,制备成平面状的非织造布复合材料,然后将非织造布复合材料沿宽度方向对接在一起,通过缝合或加衬热复合的方式制成软管。

接缝作为软管制备的关键环节,决定了软管的整体质量,有研究表明:施工过程作用在软管上的应力最高可达 6.87 MPa<sup>[3]</sup>,ASTM D5813-04、ASTM F1216、ASTM F1743、CJJ/T 244、CJJ/T 210 等标准指出:软管横向和纵向抗拉强度不低于 5 MPa,接缝抗拉强度应与主材一致<sup>[4~8]</sup>,但较少有文献针对软管接缝及使用质量进行研究。本文在固定距离和压实力等条件下,针对软管接缝不同复合温度和使用温度下的力学性能进行研究,以期无纺布软管的产业化提供参考和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

**基材:**由基层无纺布与膜层 TPU 膜组成。无纺布(涤纶

短纤),规格为 800 g/m<sup>2</sup>,外层覆 0.4 mm TPU 膜。

**封口材料:**内封口复合材料结构如图 1 所示,其中膜层为 TPU 膜,基层为涤纶无纺布,厚度分别约为 0.3 mm 和 2 mm;外封口复合材料结构如图 2 所示,其中外膜层、内膜层材质为 TPU,加强层为网格布,厚度分别约为 0.2 mm、0.2 mm 和 0.1 mm。

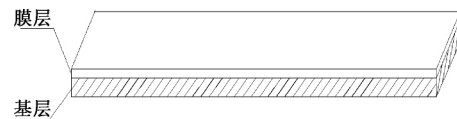


图 1 内封口示意

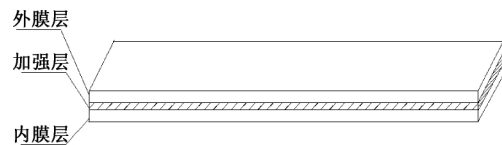


图 2 外封口示意

### 1.2 制作方法

软管结构如图 3 所示。

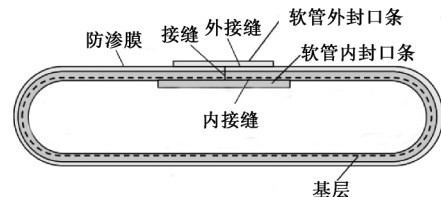


图 3 软管结构

保持固定压力为 0.1 MPa,热复合距离为 2 mm,行进速度为 2.4 m/min。采用热风焊接,风量为 60 m<sup>3</sup>/h,风压为 9 kPa,热电偶功率为 3 800 W。将热风出口温度定义为复合温度。内接缝在复合温度为 280℃、300℃、320℃、340℃、

项目基金:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07309001)。



360 °C 条件下制备;外接缝在复合温度为 240 °C、260 °C、360 °C、380 °C、400 °C、420 °C、440 °C 条件下制备。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 厚度

在土工布上截取 10 cm×10 cm 的样条,每组 10 个样条。采用 TH-060 型土工布测厚仪测定其厚度,测试压力为 2±0.1 kPa,测得样条的厚度,取平均值。

#### 1.3.2 膜层和基层熔点测定

截取膜层与基层样品,剪碎。采用 X-4 数字显微熔点测定仪对膜层和基层的熔点进行测定。通过多次测试,膜层熔融的温度范围为 165~181 °C,基层熔融的温度范围为 245~258 °C。

#### 1.3.3 接缝拉伸性能

沿接缝垂直方向截取宽度为 5 cm,长度为 160 mm 样条,每组 5 个样条。采用 CCMT 4 503 万能电子拉力机测量其拉伸性能,设置夹头间距为 100 mm,拉伸速度为 50 mm/min,测得样条的断裂强力和断裂伸长率,计算抗拉强度,取平均值。

抗拉强度(在拉伸试验过程中,试验承受的最大拉伸应力)计算见式(1)<sup>[9]</sup>:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——抗拉强度,MPa;

$F$ ——断裂强力,N;

$A$ ——样条原始横截面积,m<sup>2</sup>。

#### 1.3.4 剥离性能

截取宽度为 3 cm,长度为 10 cm 的样条,每组 5 个样条,将试样预先剥开 50 mm,采用 CCMT 4 503 万能电子拉力机测量,设置拉伸速度 100 mm/min,隔距为 5 cm,测得样条的剥离强度,取平均值。剥离强度计算见式(2):

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (2)$$

式中  $\sigma$ ——剥离强度,N/m;

$F$ ——剥离力,N;

$L$ ——试样宽度,m。

#### 1.3.5 热衰减性能

将试样置于与拉力机相连接的保温加热箱中。设置温度为 20~100 °C,每隔 20 °C 测试一组试样,每个温度下维持 5 min,样条宽度为 5 cm,长度为 160 mm,每组 5 个样条。采用 CCMT 4 503 万能电子拉力机测量,设置夹头间距为 100 mm,拉伸速度为 50 mm/min,测得样条的断裂强力和断裂伸长率,按式(1)计算抗拉强度,取平均值。

#### 1.3.6 软管接缝整体抗拉性能

对所生产的 10 m 样品管接缝进行取样。每隔 2 m 取一组样条,样条宽度为 5 cm,长度为 160 mm,每组 5 个样条,共 5 组,编号为 1-5。采用 CCMT 4 503 万能电子拉力机测量,设置夹头间距为 100 mm,拉伸速度为 50 mm/min,测得样

条断裂强力和断裂伸长率,按式(1)计算抗拉强度,取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 内接缝力学性能研究

#### 2.1.1 复合温度对内接缝抗拉性能影响

复合温度对内接缝抗拉强度的影响如表 1 所示:

表 1 不同复合温度下内接缝力学性能

复合温度/°C	断裂强力/N	断裂伸长率/%	抗拉强度//MPa
280	364.8	25	3.17
300	902.2	54	7.85
320	910.4	70	7.92
340	1 051	64	9.14
360	991.0	67	8.62

由表 1 可知,复合温度为 280 °C、300 °C、320 °C、340 °C 和 360 °C 时,内接缝断裂强力分别为:364.8 N、902.2 N、910.4 N、1 051 N 和 991.0 N;断裂伸长率分别为:25%、54%、70%、64%和 67%;抗拉强度分别为:3.17 MPa、7.85 MPa、7.92 MPa、9.14 MPa 和 8.62 MPa。

随着复合温度的不断上升,内接缝抗拉强度呈现先升高后下降的趋势。当复合温度为 340 °C 的时候,内接缝抗拉强度最大,为 9.14 MPa。因此,在本试验的条件下,内接缝的最复合温度为 340 °C。

#### 2.1.2 复合温度对内接缝剥离强度的影响

剥离强度反应材料的粘结强度。热焊接是将膜融化,通过机械压实,附着在基层表面。膜材与基层间的有效复合与基层的表面支持面积有关,支持面积越大则剥离强度越高,相应的抗拉强度越大。在不改变基层材质的情况下,本实验测试了不同复合温度下内接缝的剥离强度,结果如表 2 所示。

表 2 不同复合温度下内接缝的剥离强度

复合温度/°C	剥离强力/N	剥离强度/N/m
280	12.69	423.0
300	41.28	1 376
320	ND	ND
340	ND	ND
360	ND	ND

注:ND,超出检测量程。

由表 2 可知,复合温度低于 280 °C 时,内接缝剥离强力较小,剥离强度为 423.0 N/m;超过 300 °C 时,其剥离强力升高,剥离强度达到 1 376 N/m 以上。

复合温度低于 280 °C 时,试样的剥离强度相对较小,主要通过压痕的机械锁结相互粘接。随着复合温度的逐渐提高,剥离强度增大。当复合温度达到 300 °C 时,内接缝剥离强度有较大的提高,这是因为复合温度升高,使膜表面逐渐软化成为黏流体,能够对无纺布表面纤维进行润湿与包埋,能够形成较大的粘接面<sup>[11]</sup>。

#### 2.1.3 内接缝力学性能受热衰减情况

若管道修复过程中采用热固化树脂,热固化树脂放热温



度可达 100 °C 以上<sup>[12]</sup>。施工过程中由于温度的升高,接缝强度会受到一定程度的影响,实验测试了不同使用温度对接缝抗拉强度的影响,结果如表 3 所示。

表 3 不同使用温度下内接缝抗拉强度

使用温度/°C	断裂强力/N	断裂伸长率/%	抗拉强度/MPa
20	1 051	64	9.14
40	1 342	31	11.7
60	843.3	67	7.33
80	559.6	55	4.87
100	201.2	27	1.75

由表 3 可知,当使用温度为 20 °C,40 °C,60 °C,80 °C 和 100 °C 时,内接缝断裂强力分别为:1 051 N,1 342 N,843.3 N,559.6 N 和 201.2 N;断裂伸长率分别为:64%,31%,67%,55%和 27%;抗拉强度分别为:9.14 MPa,11.7 MPa,7.33 MPa,4.87 MPa 和 1.75 MPa。

内接缝抗拉强度随着温度升高呈先升高后下降的趋势,使用温度为 100 °C 时,衰减幅度为 80.85%。

## 2.2 外接缝力学性能研究

### 2.2.1 复合温度对外接缝抗拉性能影响

不同复合温度对外接缝抗拉强度的影响如表 4 所示。

表 4 不同复合温度下外接缝力学性能

复合温度/°C	断裂强力/N	断裂伸长率/%	抗拉强度/MPa
360	479.4	18	19.2
380	740.7	19	29.6
400	563.0	16	22.5
420	598.9	16	23.9
440	600.0	16	24.0

由表 4 可知,复合温度为 360 °C,380 °C,400 °C,420 °C 和 440 °C 时,外接缝断裂强力分别为:479.4 N,740.7 N,563.0 N,598.9 N 和 600.0 N;断裂伸长率分别为:18%,19%,16%,16%和 16%;抗拉强度分别为:19.2 MPa,29.6 MPa,22.5 MPa,23.9 MPa 和 24.0 MPa。

外接缝抗拉强度随着复合温度呈现先升高后下降的趋势。当复合温度为 380 °C 的时候,外接缝抗拉强度最大,为 29.6 MPa。因此,在本实验的条件下外接缝的最适复合温度为 380 °C。

### 2.2.2 复合温度对外接缝剥离强度的影响

外接缝热焊接与内接缝热焊接机理不同,外接缝热焊接属于膜与膜之间的焊接,膜层的融化粘合程度决定了两者之间的剥离强度,实验测试了不同复合温度对外接缝剥离强度的影响,如表 5 所示。

表 5 不同复合温度下外接缝剥离强度

复合温度/°C	剥离力/N	剥离强度/N/m
220	12.24	408.0
240	26.25	875.0
260	163.3	5 443
280	ND	ND
360~440	ND	ND

注:ND,超出检测量程。

由表 5 可知,复合温度低于 220 °C 时,外接缝剥离强度较小,为 408 N/m;复合温度超过 260 °C 时,剥离强度达到 5 443 N/m 以上。

当受热温度超过 PU 膜黏流温度时,由于聚氨酯分子链的整体运动,膜层开始有明显的流动,进入粘流态,膜层在压力作用下发生塑形形变,相互粘接,经冷却成型后,其形变会保持下来,从而具有一定的粘接力。当复合温度低于 220 °C 时,融化的膜层较薄,因此其剥离强力较低,当复合温度高于 260 °C 时,膜层融化较多,剥离强力有了较大的提高,进一步提高外接缝的抗拉强度。

### 2.2.3 外接缝力学性能受热衰减情况

不同使用温度对外接缝抗拉强度的影响如表 6 所示。

表 6 不同使用温度下外接缝抗拉强度

使用温度/°C	断裂强力/N	断裂伸长率/%	抗拉强度/MPa
20	895.4	32	44.8
40	1 611	23	64.4
60	378.4	19	15.1
80	274.3	14	11.0
100	187.9	17	7.52

由表 6 可知,使用温度为 20 °C,40 °C,60 °C,80 °C 和 100 °C 时,外接缝断裂强力分别为:895.4 N,1 611 N,378.4 N,274.3 N 和 187.9 N;断裂伸长率分别为:32%,23%,19%,14%和 17%;抗拉强度分别为:44.8 MPa,64.4 MPa,15.1 MPa,11.0 MPa 和 7.52 MPa。

外接缝抗拉强度随使用温度呈先升高后下降的趋势,使用温度为 100 °C 时,衰减幅度为 83.21%。

## 2.3 接缝整体力学性能

### 2.3.1 抗拉性能

为考察接缝整体力学性能,实验测试了软管接缝整体抗拉强度,结果如图 4 所示。

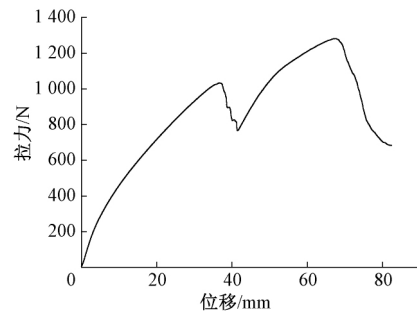


图 4 软管接缝整体抗拉强度测试

从图 4 中可以看出,接缝整体抗拉强度测试中存在两个峰值,第一个峰值为内接缝的断裂强力,为 999.8 N,第二个峰值为外接缝断裂强力,为 1 386 N。断裂伸长率及抗拉强度如表 7 所示。

由表 7 可知,内、外接缝平均抗拉强度分别为 8.69 MPa 和 55.4 MPa,平均断裂伸长率分别为 37%和 76%。



表 7 接缝整体拉伸性能

项目		1	2	3	4	5	平均值
内接缝	断裂伸长率/%	33	36	43	37	37	37
	抗拉强度/MPa	8.41	8.95	9.42	8.64	8.05	8.69
外接缝	断裂伸长率/%	59	61	65	88	108	76
	抗拉强度/MPa	45.5	48.9	46.3	62.8	73.7	55.4

与单独内接缝相比,同等条件下,内接缝抗拉强度略有衰减,由 9.14 MPa 降低到 8.69 MPa,衰减幅度为 4.923%。与单独外接缝相比,外接缝抗拉强度明显提升,由 29.6 MPa 提高至 55.4 MPa,增强幅度为 87.16%。软管整体接缝抗拉强度优于单独接缝,由于翻转施工后,外接缝朝向内侧,承受主要的径向应力,该强度能够保证施工的安全性。

### 2.3.2 接缝力学性能受热衰减情况

整体接缝受热衰减情况如图 5 所示。

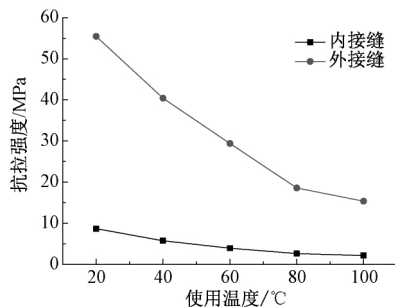


图 5 不同使用温度下接缝力学性能

从图 5 中可知,使用温度由 20 °C 升高到 100 °C 的时候,接缝整体抗拉强度逐渐降低,内接缝抗拉强度由 8.69 MPa 降低到 2.14 MPa,衰减幅度为 75.37%;外接缝抗拉强度由 55.4 MPa 降低到 15.4 MPa,衰减幅度为 72.20%。外接缝抗拉强度高于内接缝抗拉强度,主要是由于膜与膜的焊接时支撑面连续,膜与布的焊接时支撑面不连续,且膜与膜之间的相容性要优于膜与布所致,整体接缝力学性能优于单侧接缝,软管整体接缝性能能够满足标准要求。

### 3 结论

(1)随着复合温度的提高,内接缝断裂强力及抗拉强度呈现先升高后下降的趋势,在本实验的条件下,内接缝的最适复合温度为 340 °C,断裂强力和抗拉强度分别可达到 1 051 N 和 9.14 MPa,剥离强度达 1 376 N/m 以上;外接缝断裂强力及抗拉强度呈现先升高后下降的趋势,外接缝的最适复合温度为 380 °C,断裂强力和抗拉强度分别可达 740.7 N 和 29.6 MPa,剥离强度达 5 443 N/m 以上。

(2)随着使用温度的不断升高,内外接缝抗拉强度呈现先升高后下降的趋势,在 100 °C 时,内外接缝抗拉强度衰减幅度分别为 80.85% 和 83.21%。由于粘接机理不同,外接缝的抗拉强度高于内接缝,整体接缝力学性能优于单侧接缝。

经此条件生产的软管,其整体接缝性能能够满足标准要求。

### 参考文献

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴.北京:中国统计出版社,2017.
- [2] 王瑞,张淑洁,张丽.管道修复用管状纺织复合材料的管径设计.复合材料学报,2010,27(3):196-199.
- [3] 张淑洁,王瑞,徐磊,等.管状纺织复合材料力学性能的有限元分析.纺织学报,2008,29(5):51-54.
- [4] American Society for Testing and Materials. ASTM D5813-04-2012 Standard Specification for Cured-In-Place Thermosetting Resin Sewer Piping Systems. ASTM International, 2012.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM F1216-2016 Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube. ASTM International, 2016.
- [6] American Society for Testing and Materials. ASTM F1743-2017 Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Pulled in Place Installation of Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP). ASTM International, 2017.
- [7] CJJ/T 244-2016 城镇给水管道非开挖修复更新工程技术规程.2016.
- [8] CJJ/T 210-2014 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程.2014.
- [9] GB/T 1040.1-2006 塑料拉伸性能的测定 第 1 部分:总则.2006.
- [10] FZ/T 60011-2016 复合织物剥离强力试验方法.2016.
- [11] 刘让同,任继江,李亮.复合土工膜剥离强度的影响因素分析.棉纺织技术,2011,39(9):11-13.
- [12] 郭逢治.不饱和聚酯树脂固化放热曲线的测定及其应用.塑料工业,1981,(4):22-27.

∞ 通信作者:曹井国

电话:13752721342

E-mail:cjg@tust.edu.cn

通讯处:300222 天津河西区大沽南路 1038 号天津科技大学 526 信箱

收稿日期:2018-08-15