



·国家重点研发计划“高龄服役管线输配安全劣化机制及系统调控技术与装备”专栏·

# 纤维增强复合软管折叠法修复既有管道全过程力学响应数值模拟

王学灏<sup>1</sup> 刘书明<sup>2</sup> 邱宇<sup>1</sup> 马保松<sup>1</sup> 黄胜<sup>1</sup>

(1 中山大学土木工程学院, 珠海 519082; 2 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:**我国城市供水管网中老龄管道占比增加,传统开挖更换成本高、影响大。纤维增强软管折叠技术因高强度、耐腐蚀等优势,成为非开挖修复的潜在解决方案,但其在供水领域的力学行为尚不明确。通过拉伸试验与非线性有限元模拟,揭示了芳纶/TPU 复合软管在折叠—穿插—复圆全过程的力学响应规律。研究发现:材料应力—应变曲线呈现三阶段特征,拉伸强度达 49.63 MPa,芳纶纤维与 TPU 基体的协同作用赋予其高强高韧特性;折叠—复圆过程中,管顶(压轮接触区)环向应力最大(43.87 MPa),纤维铺设角度影响应力与层间粘合性能;过弯工况模拟显示,牵引力峰值与过弯角度正相关(90°较 30°提升 329%)、与半径负相关(1D 较 4D 提升 428%),但软管应力始终低于抗拉强度。

**关键词:**供水管道;非开挖修复;纤维增强内衬软管;折叠—复原;牵引过弯

中图分类号: TU990

文献标识码: A

文章编号: 1002—8471(2025)11—0129—08

DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2025.04.24.0006

**引用本文:**王学灏,刘书明,邱宇,等.纤维增强复合软管折叠法修复既有管道全过程力学响应数值模拟[J].给水排水,2025,51(11):129-136. WANG X H, LIU S M, QIU Y, et al. Research on the Mechanical Response of the Entire Process of Repairing Water Supply Pipelines with Fiber-Reinforced Lining Hoses[J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(11): 129-136.

## Research on the Mechanical Response of the Entire Process of Repairing Water Supply Pipelines with Fiber-Reinforced Lining Hoses

WANG Xuehao<sup>1</sup>, LIU Shuming<sup>2</sup>, QIU Yu<sup>1</sup>, MA Baosong<sup>1</sup>, HUANG Sheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The proportion of aging pipelines in China's urban water supply networks is increasing. Traditional excavation-based replacement methods are costly and highly disruptive. The lining method with inserted hoses, featuring high strength and corrosion resistance, has emerged as a potential trenchless rehabilitation solution, yet its mechanical behavior in water supply applications remains insufficiently understood. This study investigates the mechanical response of aramid/TPU composite hoses throughout folding-insertion-reversion processes through tensile tests and nonlinear finite element simulations. Key findings include: The stress-strain curve exhibits three distinct phases, with a tensile strength reaching 49.63 MPa, demonstrating high strength-toughness synergy between aramid fibers and TPU matrix. During folding-reversion, maximum circumferential

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208104);广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087)。



stress (43.87 MPa) occurs at the crown (roller contact zone), while fiber orientation angles significantly affect stress distribution and interlayer bonding; Simulation of bending conditions reveals traction force peaks positively correlate with bending angles (329% increase at  $90^\circ$  vs  $30^\circ$ ) and negatively with radii (428% increase at  $1D$  vs  $4D$ ), though hose stresses remain below tensile strength.

**Keywords:** Water supply pipeline; Trenchless rehabilitation; Fiber-reinforced lining hose; Folding-restoration; Traction bending

## 0 引言

我国城市地下管道在经历 2000—2020 年的快速建设期后,大量在役供水管道(特别是早期建设的铸铁、混凝土管)运行已达 15~30 年,进入老龄阶段,存量管网的维护修复已成为当前主要任务<sup>[1]</sup>。在交通繁忙地段采取原有的开挖路面埋设新管的方式将无法适应新形势下城市建设的要求,非开挖管道更新修复技术可弥补原有技术的不足,减少对交通、周围环境的影响,降低施工成本<sup>[2-3]</sup>,具有广阔的发展前景。

非开挖修复技术中,折叠内衬法是指将塑料管道(常用 HDPE 或 PVC 管道)压制“C”或“U”型后绑扎并卷成卷盘,随后将其牵引置入旧管道中,最后通过加热、加压的方法使其恢复原状并与旧管壁紧密贴合,实现对供排水管道、燃气管道的半结构性修复的方法(见图 1)。近年来,为了克服 HDPE 管的一些缺点(如施工作业面积大、工作温度受限制、弯曲半径较大、接头需人工焊接等),纤维增强复合软管逐渐被采用在折叠内衬法施工中<sup>[4]</sup>。该类管材结构类似,通常由三个不同的熔合粘合层组成,内外层通常为高分子聚合物,中间为纤维增强层,具有耐腐蚀、施工快捷、寿命长等优势。一种常用于燃气管道的纤维增强复合软管结构如图 2 所示,外层是热塑性聚氨酯(TPU),中间层是芳族聚酰胺 Kevlar 纤维(K29)的编织织物,内层是聚偏二氟乙烯聚合物(PVDF),理想情况下层间无相对滑动。

针对纤维增强复合软管折叠法,一些学者从修复机理与修复效果评估方面展开了研究。LU 等<sup>[8]</sup>以老化燃气管道为研究对象,研究了该技术对于具有均匀腐蚀缺陷管道的修复效果,研究了残余厚度、直径、压力和埋深对管道应力的影响,发现该技术可以有效降低老化管道的应力。BARSOUM 等<sup>[9]</sup>将

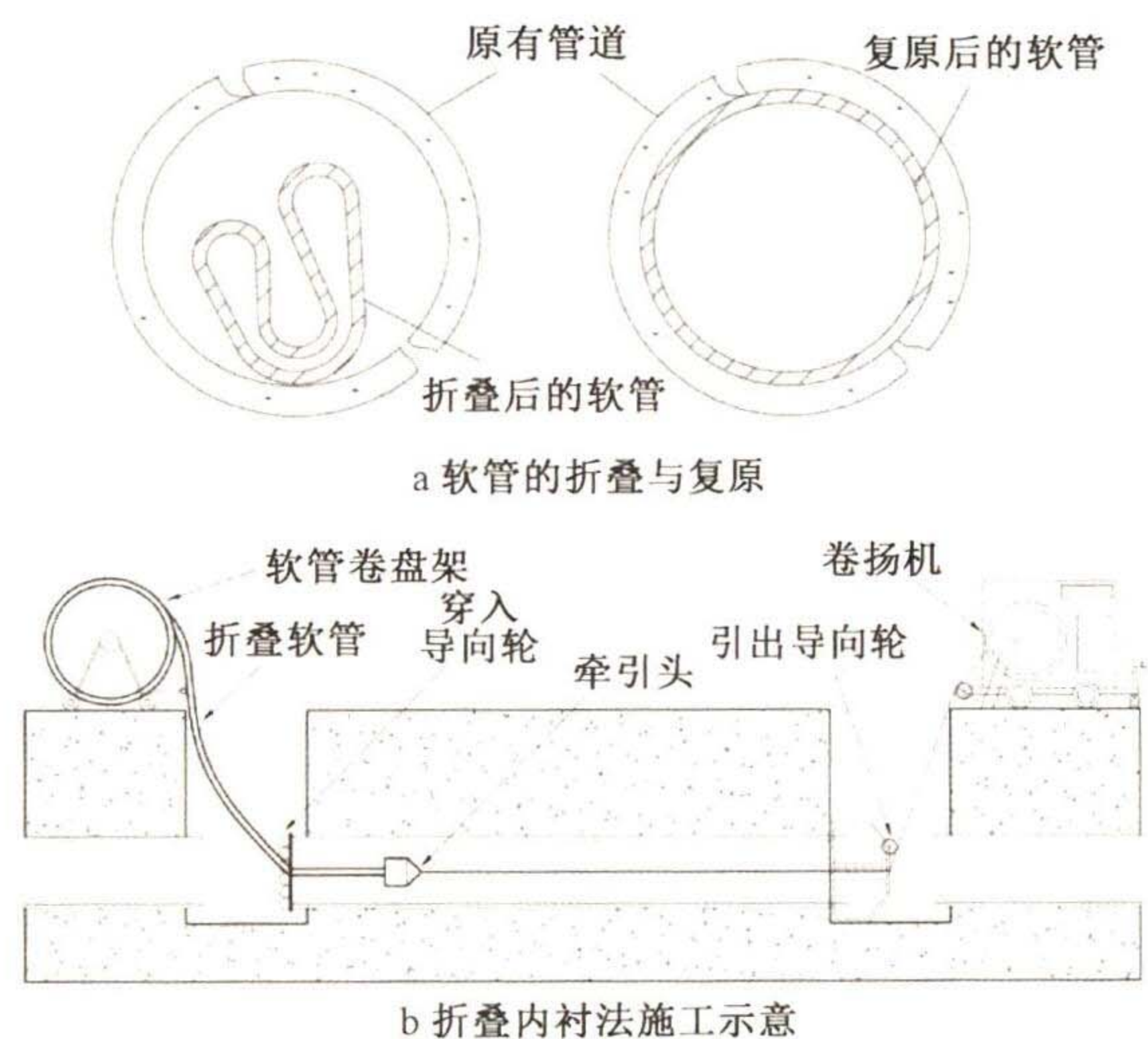


图 1 折叠内衬技术施工方法

Fig. 1 Construction method of folding lining technology

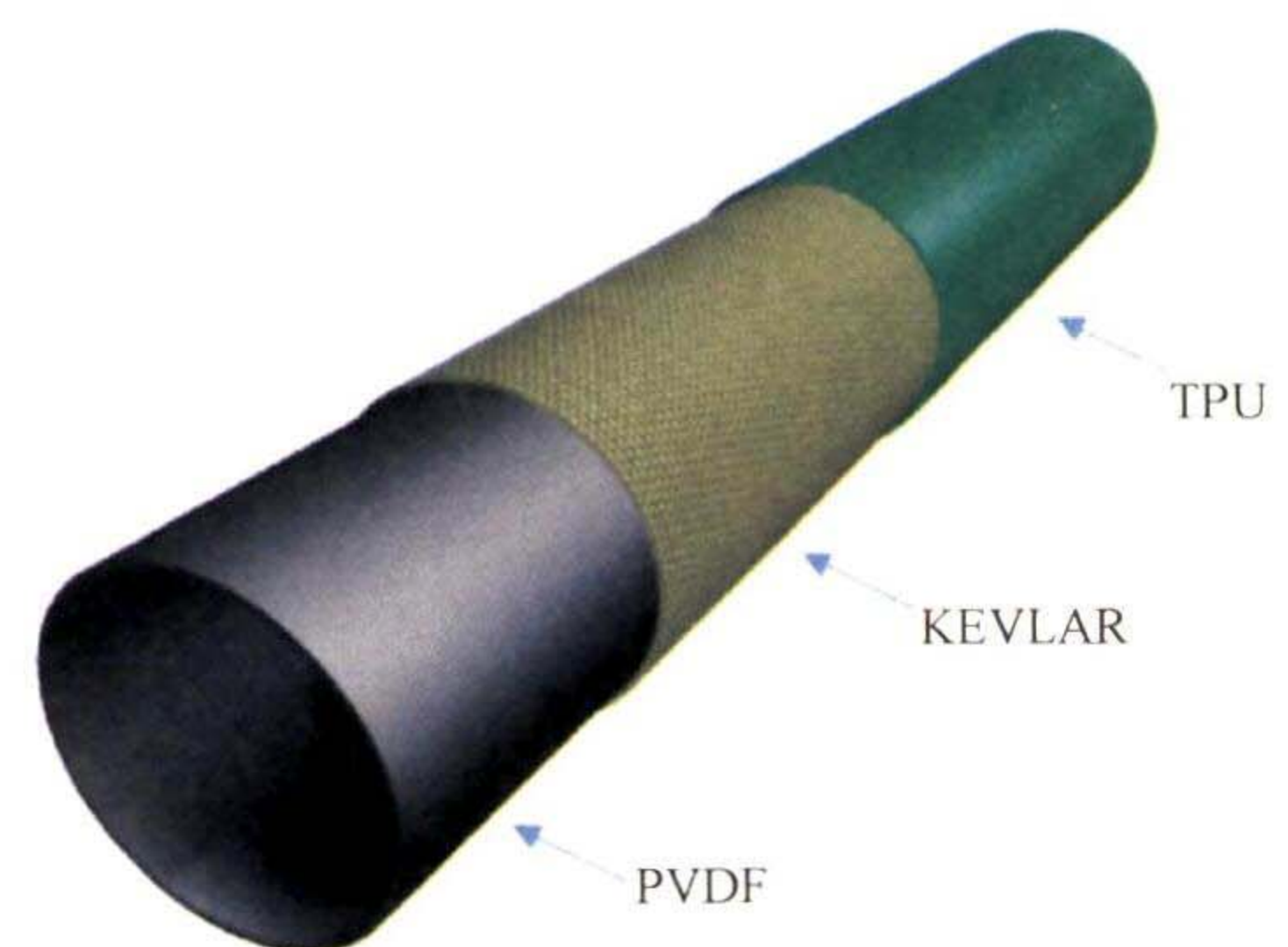


图 2 一种典型纤维增强复合软管结构

Fig. 2 A typical fiber-reinforced lined hose structure

三层复合衬层材料模拟为均匀固体,采用橡胶和弹性体建模时常用的各向同性二阶多项式超弹性模型,模拟衬层材料的非线性弹性应力应变行为。XI 等<sup>[10]</sup>通过理论计算和数值模拟的方法,研究了弯曲角度和内壁粗糙度等因素对牵引力的影响,证实了该技术修复海底管道的可行性。于庆龙<sup>[11]</sup>通过对软管内衬材质性能评价、管道修复缩径后水力计算,



确定使用涤纶纤维增强 TPU 复合软管修复后管径可满足生产实际需求,时效可提高 50%,节省更换成本 10%~25%。艾龙等<sup>[12]</sup>针对海底油气开采中使用的纤维增强柔性管,分析了纤维铺设层数与角度对于其在拉伸、弯曲和扭转工况下的力学响应。

目前纤维增强复合软管大多用于油气与燃气管道<sup>[13]</sup>,而供水管网中应用较少,大多依然使用 PE 或 HDPE 管道。2025 年,国标《地下供水管网非开挖修复用塑料管道系统 第 11 部分:软管穿插内衬法》(GB/T 3982.11-2025)对软管所用材料的卫生性能做出了规定<sup>[14]</sup>,该技术可用于供水管网;此外,软管各层采用热熔复合的方式连接,不使用界面胶黏剂,保障用水安全。鉴于其高强度、高耐久、结构壁光滑、过流断面损失小等优势,纤维增强复合软管折叠技术具有广阔的应用前景。因此,了解其安装过程背后的机制,解析其折叠—穿插—膨胀复圆全过程力学行为,对高效修复高龄供水管道具有重要意义。

基于此,本文进行纤维增强软管拉伸试验,在此基础上建立非线性有限元(FE)模型来模拟该新型内衬的完整安装过程,重点研究其折叠与穿插过程的力学响应,以期纤维增强复合软管折叠技术在供水管网修复工程中的实际应用提供参考。

### 1 纤维增强复合软管拉伸力学性能

试验所采用的纤维增强复合软管由三层材料复合而成,内外层均为光滑的热塑性聚氨酯(TPU),中间层为增强强度作用的编织涤纶纤维夹层(PP-TA,聚对苯二甲酰对苯二胺),软管尺寸与性能参数如表 1 所示。根据《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》(GB/T 1447-2005)<sup>[15]</sup>,按照规定尺寸从软管上取样,测量试样工作段任意三处的宽度和厚度精确到 0.02 mm 并取其算术平均值。测试拉伸弹性模量时以 2 mm/min 的速度加载,测定拉伸强度时以 10 mm/min 均匀加载直至试件完全破坏,记录屈服载荷、破坏载荷及试样破坏形式(见图 3)。

如图 4 所示,以试样 5 为例,在初始阶段,内衬

表 1 纤维增强复合软管性能参数

Tab. 1 Performance parameters of composite hoses

内径/mm	壁厚/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	工作压力/MPa
300±3	4	1.44	2.0

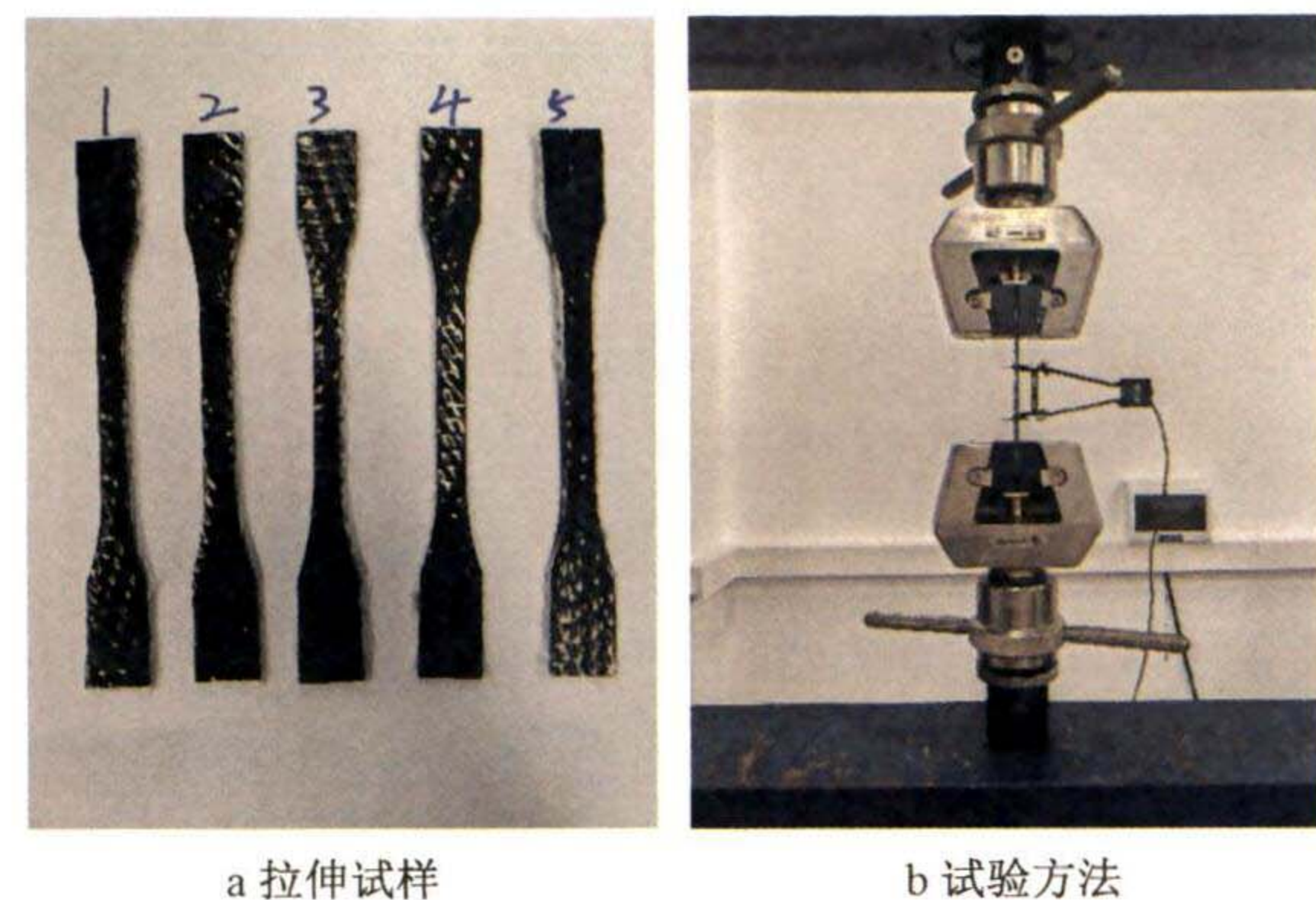


图 3 纤维增强复合软管管材拉伸性能测试

Fig. 3 Tensile performance test of fiber-reinforced hose materials

材料的应力( $\sigma$ )与应变( $\epsilon$ )呈线性关系,遵循胡克定律,材料受纤维增强层和 TPU 基体的组合影响;第二阶段,曲线表现为斜率先出现小幅度减小,材料可能出现局部轻微的纤维断裂,但整体保持结构稳定,随后斜率有小幅度提升,可能是由于未断裂的纤维在拉伸中逐渐沿载荷方向重新排列,承载效率提高,应力增速加快;第三阶段,材料持续受力直至断裂点,发生纤维断裂、界面脱层现象,而内外的 TPU 基体层因为具有较好弹性,并未断裂,但抗拉能力大幅降低,应力值断崖式下降。涤纶纤维自身的弹性模量高,但断裂伸长率较低(3.6%)<sup>[16]</sup>,而 TPU 层大幅提高了复合材料的极限变形能力。材料的平均抗拉强度( $\sigma_b$ )与拉伸弹性模量分别为 49.63 MPa、716.81 MPa,试验数据如表 2 所示。

### 2 纤维增强复合软管折叠—复原力学行为

#### 2.1 有限元模型

针对拉伸测试结果建立有限元模型,模拟软管折叠、复原过程。模型包括软管(DN250 mm)、既

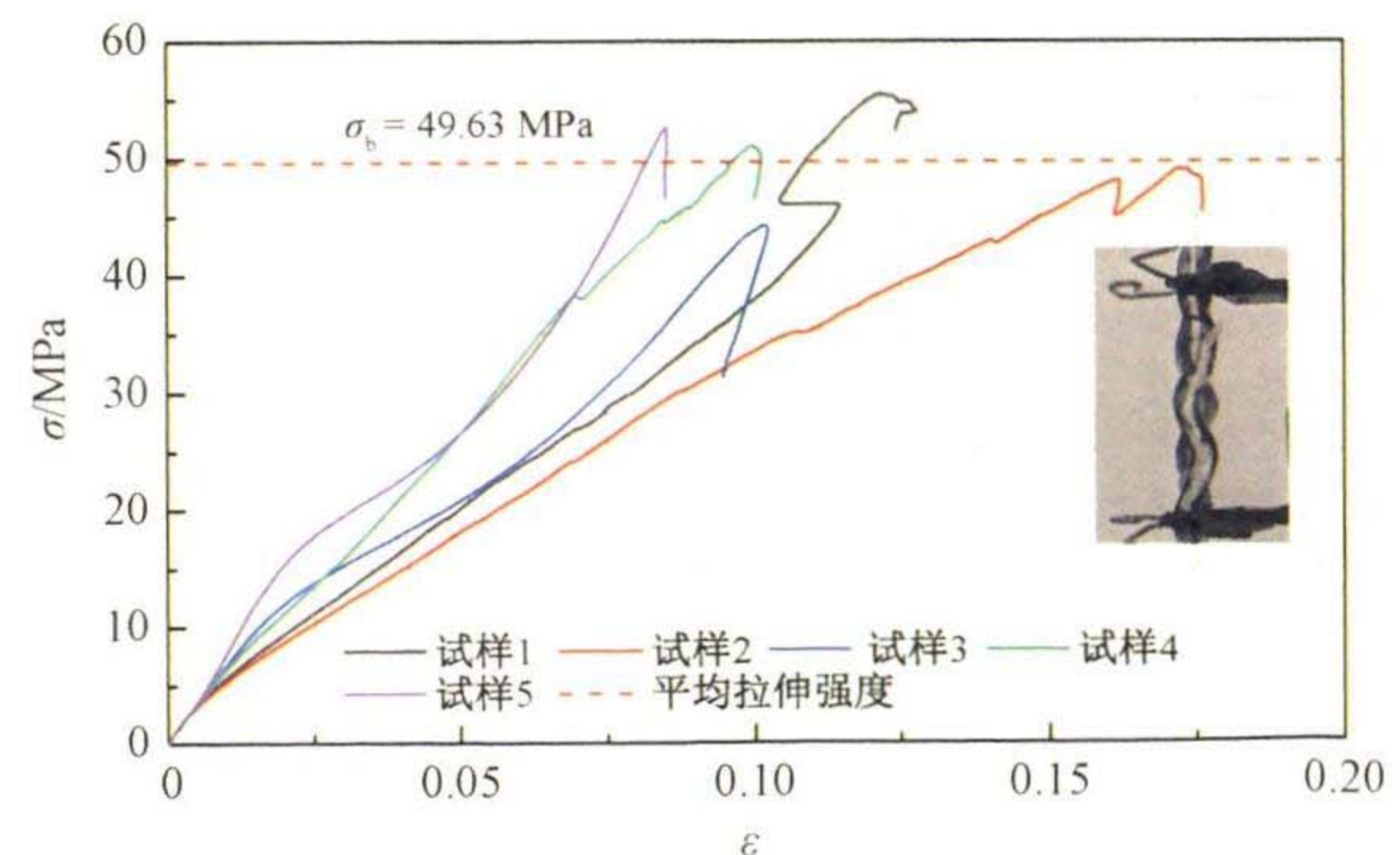


图 4 纤维增强复合软管管材应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of fiber-reinforced hose material



有管道(DN250 mm)、用于绑扎的缠绕带三部分。软管总长度为 1 000 mm,为提高计算效率,软管采用壳单元 S4R 模拟,既有管道使用离散刚体部件。针对试验所使用的软管,根据表 1 材料参数进行单层建模,对三层应力-应变行为进行平均表示。缠绕带可近似视为无弯曲刚度的材料,适合采用四节点膜单元(M3D4R)进行划分。缠绕带材料的应力-应变曲线如图 5 所示,其弹塑性力学参数如表 3 所示<sup>[9]</sup>,采用单元去除技术,当等效塑性应变超过断裂应变时自动删除单元。

表 2 纤维增强复合软管拉伸试验结果

Tab. 2 Tensile test results of fiber-reinforced hose

试样	横截面积 /mm <sup>2</sup>	最大力 /N	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /MPa
#1	38.22	2 118.40	55.42	734.93
#2	40.91	2 004.80	49.01	764.59
#3	39.20	1 731.60	44.17	669.15
#4	39.56	2 018.00	51.01	719.39
#5	37.83	1 989.00	48.51	695.99
平均值	—	—	49.63	716.81

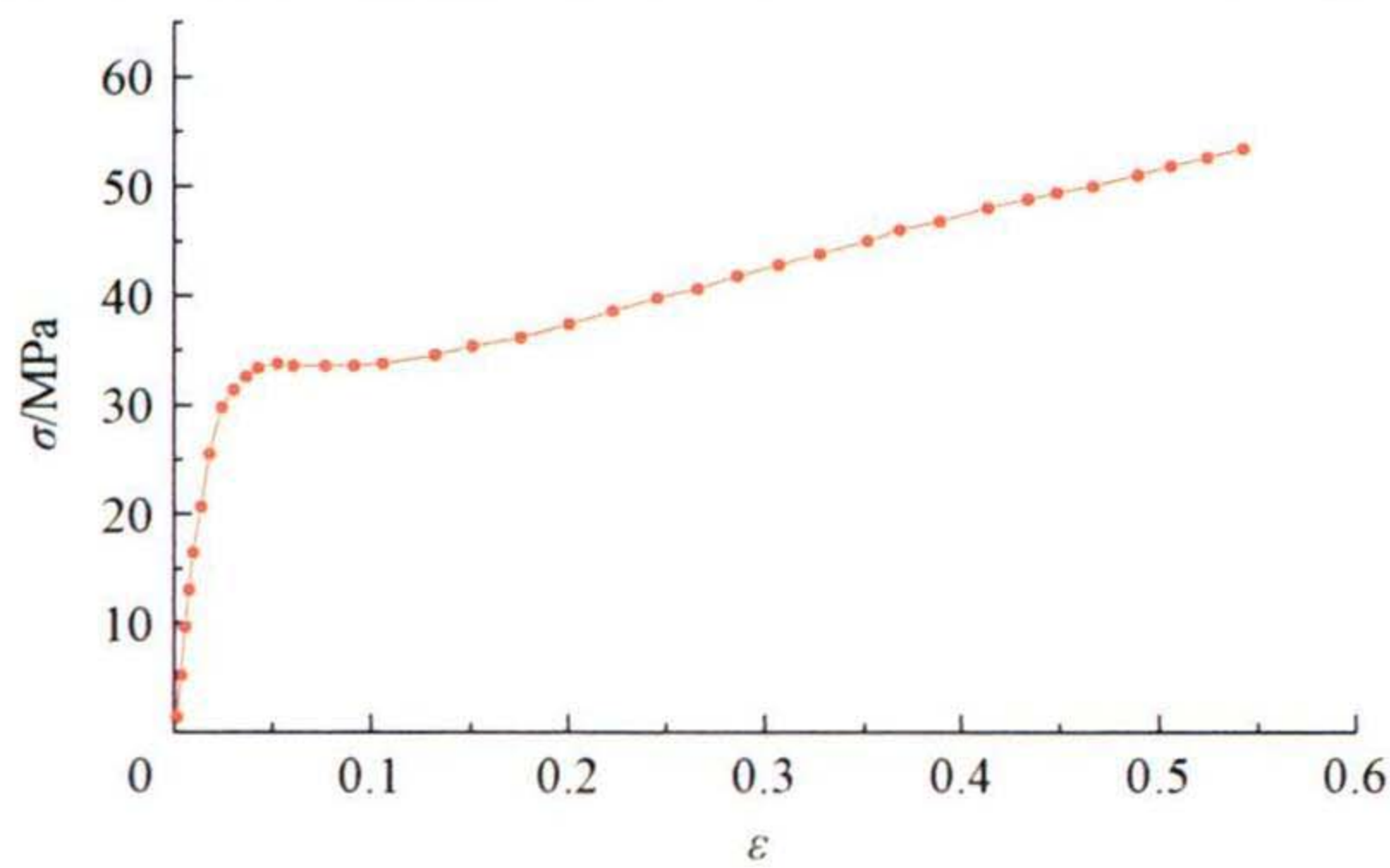


图 5 缠绕带应力(σ)-应变(ε)曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of winding tape materials

表 3 缠绕带材料弹塑性力学参数

Tab. 3 Elastoplastic mechanical parameters of winding tape materials

弹性模量 E/MPa	断裂强度 $\sigma_f$ /MPa	断裂应变 $\epsilon_f$	初始屈服强度 $\sigma_0$ /MPa	初始屈服应变 $\epsilon_0$
1270	53	0.22	30	0.0245

折叠和展开分析模型如图 6 所示,模型另设置额外的 2 个离散刚体平板来辅助折叠过程。在管顶、平板旋转轴处设置参考点,以运动耦合的方式将软管压扁,再借助两侧平板的旋转将软管折叠成“U”型,然后在软管外部使用缠绕带绑扎固定,施加内压使其恢复成圆形并与既有管道紧密贴合。为贴合工程实际,加压膨胀过程采用动力隐式求解方式。折叠-复原过程如图 7 所示。

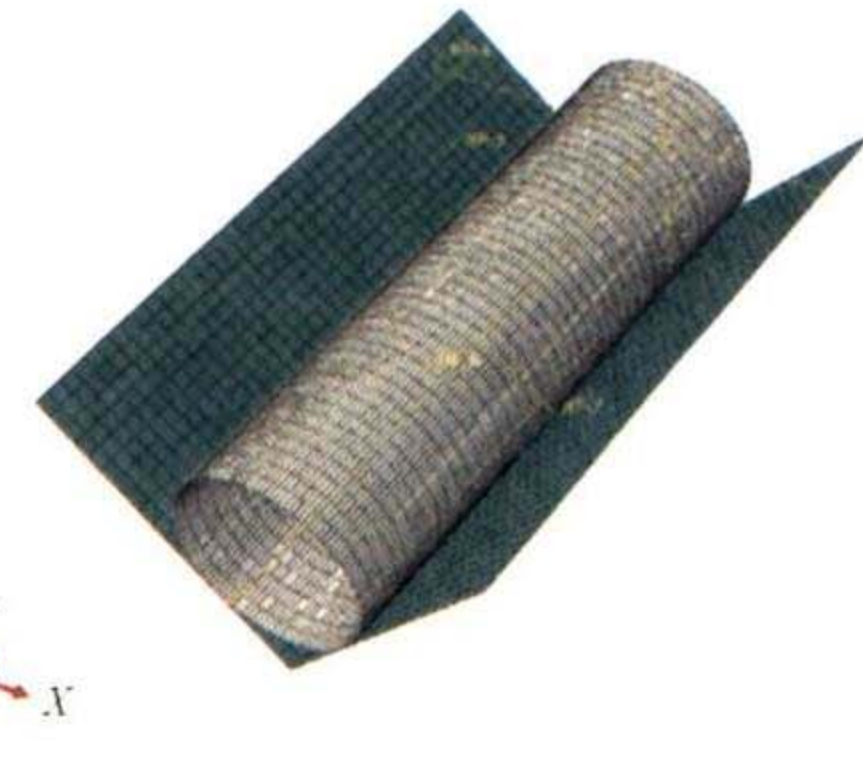
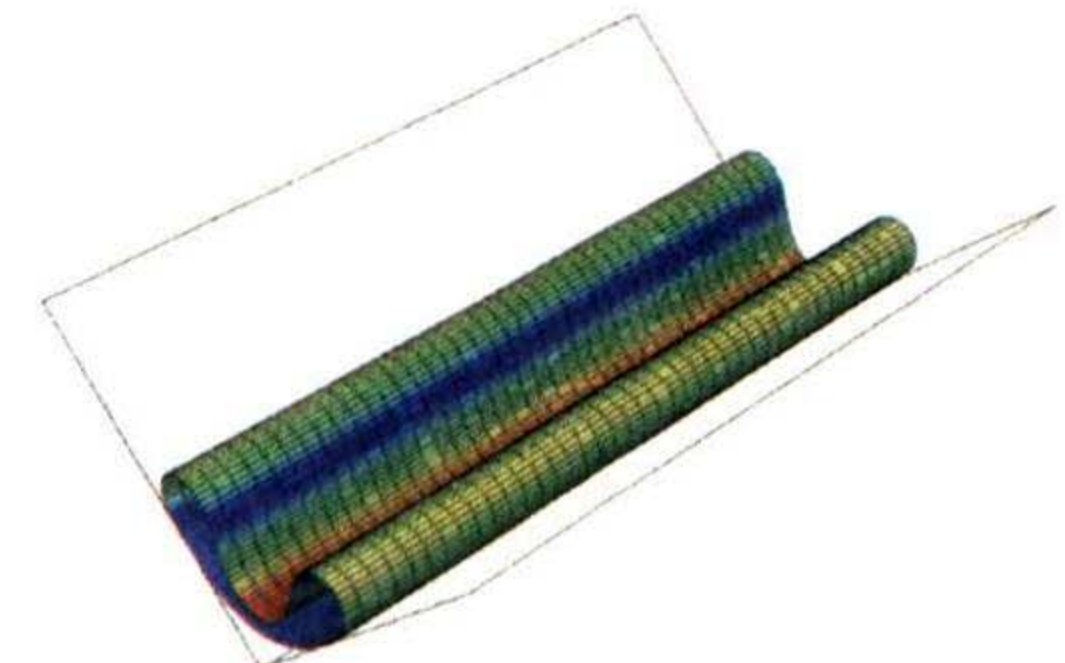
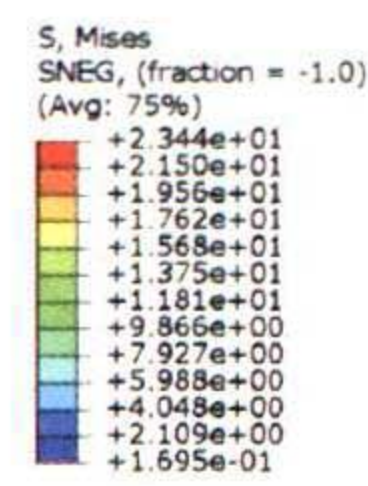
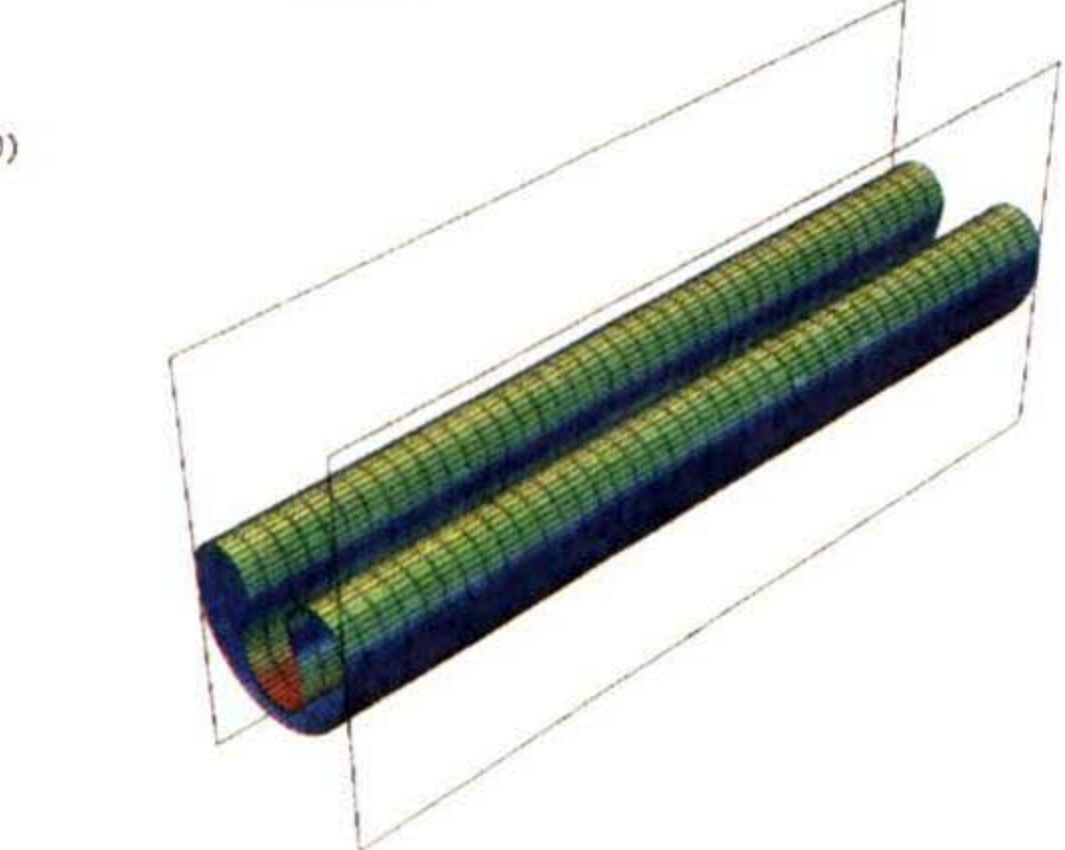
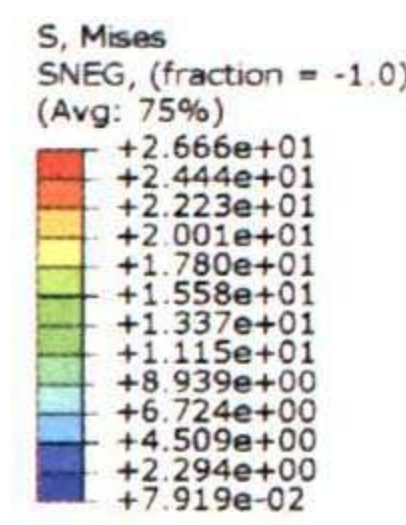


图 6 折叠软管有限元模型

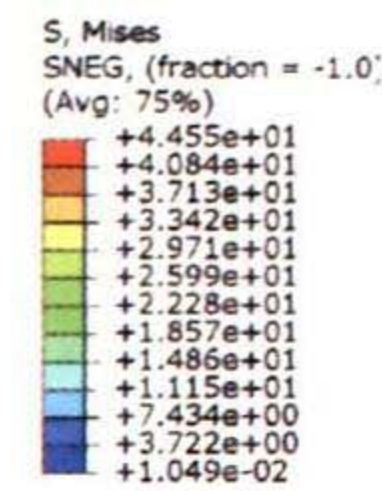
Fig. 6 Finite element model of hose folding



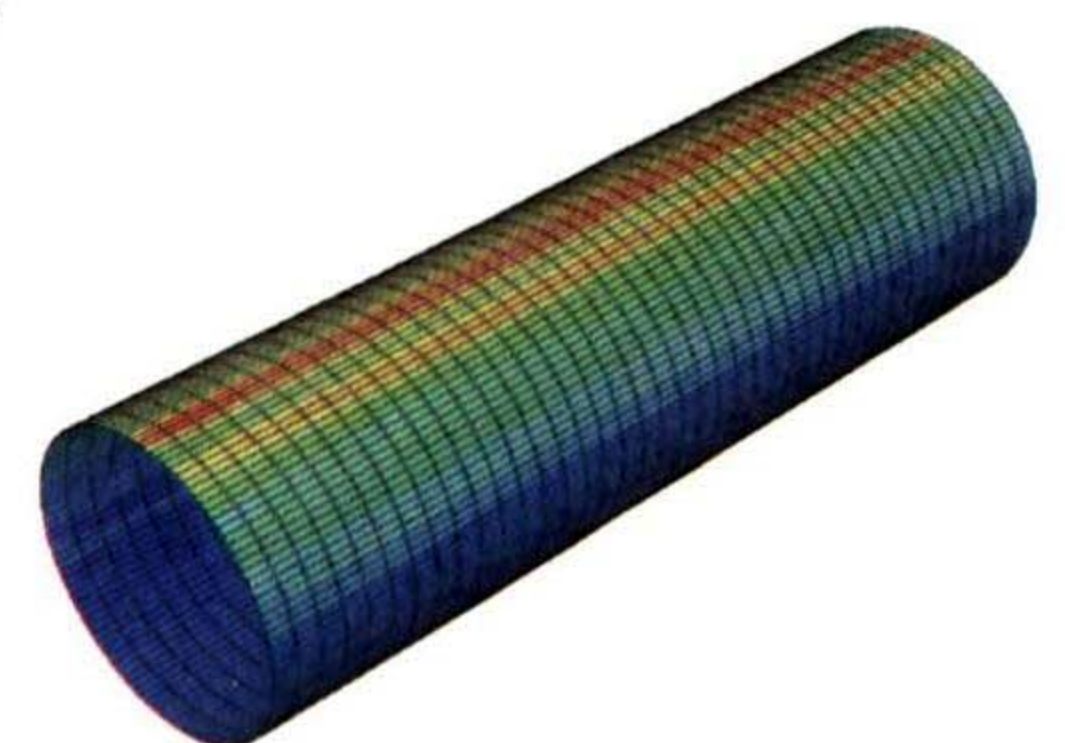
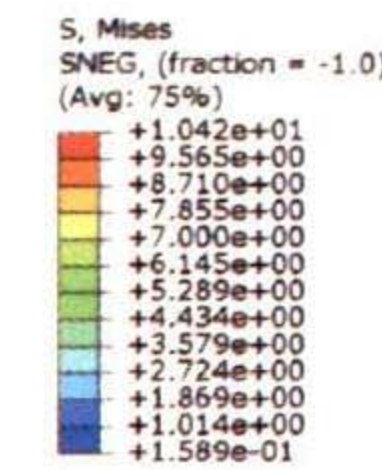
a 压平



b 折叠



c 加压



d 复原

图 7 软管折叠-复原过程

Fig. 7 Hose folding-restoration process



### 2.2 软管折叠—复原受力特性

为研究折叠内衬法施工全过程软管受力特性,选取 5 个关键时间点,分别为软管压平(Step time=1)、折叠中(Step time=1.5)、折叠完成(Step time=2)、缠绕带破裂(Step time=2.2)和膨胀复原(Step time=3),分析软管的环向应力分布情况。如图 8 所示,在压平和折叠阶段,内衬软管的应力在管顶处最大,在起拱线处次之,且随着折叠的进行(Step time=1~2)应力值逐渐增大;在加压阶段,缠绕带在断裂前给予软管周向约束,在断裂时管顶呈现出全过程最大应力值(43.87 MPa),且在 45°、125°附近形成较小的应力极值,这与软管的截面形状相吻合;缠绕带断裂后,软管应力逐渐降低,在与既有管道完全贴合后,呈现出从管底到管顶(10.42 MPa)逐渐增大的趋势。

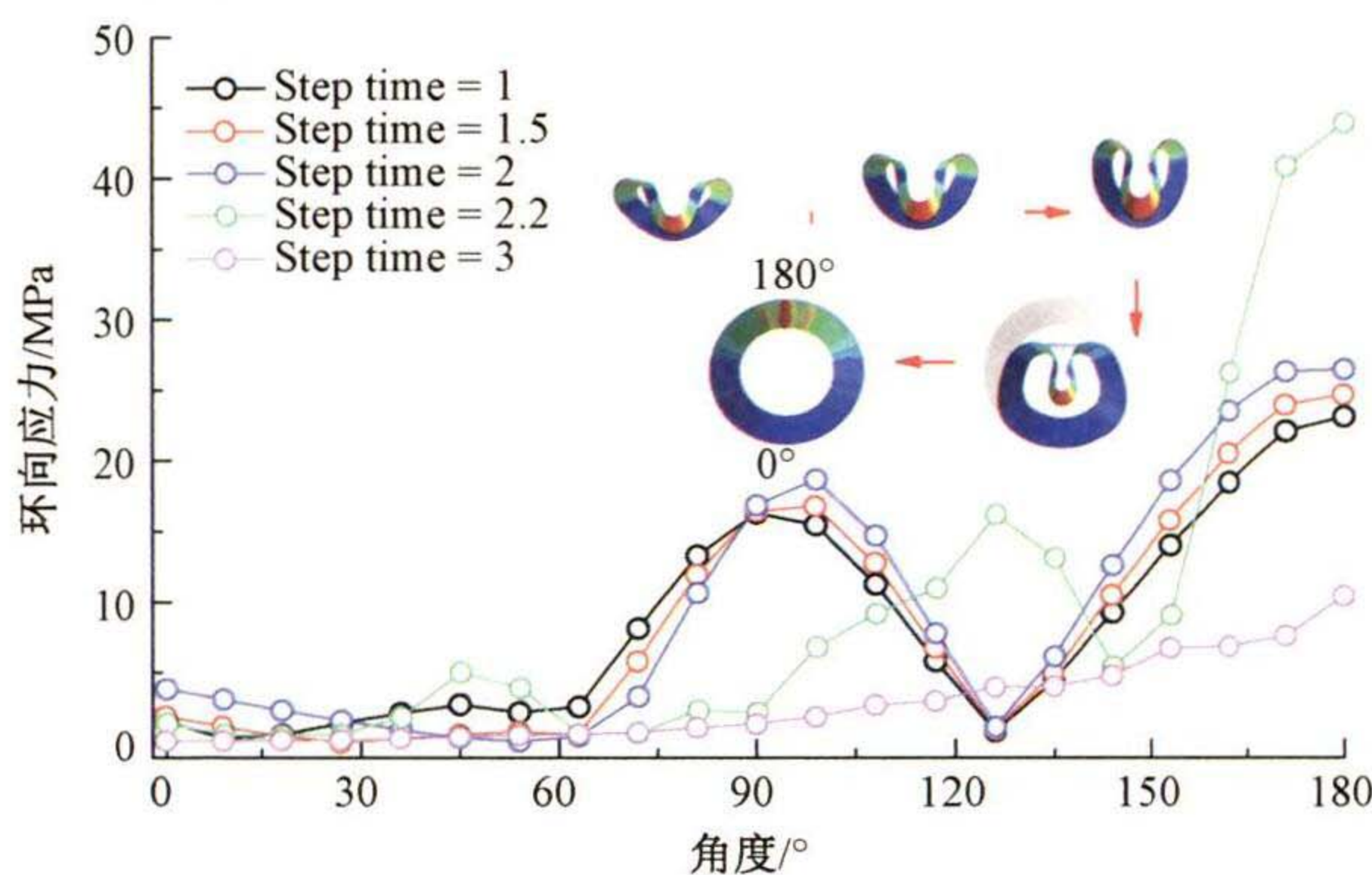


图 8 折叠—复原过程关键时刻环向应力分布

Fig. 8 Circumferential stress distribution at critical moments in the folding-restoration process

### 2.3 纤维铺设角度对软管应力的影响

在柔性管的设计生产中,增强层纤维的铺设角度是其中的关键点,已有学者分析了纤维铺设角度对复合材料油气管在拉伸、弯曲、扭转等简单工况下应力的影响机制<sup>[12]</sup>。而对于非开挖修复用纤维增强内衬软管,目前尚不明确铺设角度对折叠过程中软管受力特性的影响。基于此,选用  $\theta = \pm 30^\circ \sim \pm 70^\circ$  作为增强层的纤维铺设角度进行结构分析,如图 9 所示。2.1 节所述模型是依照测试结果而构建的等效单层模型,本节为了探讨铺设角度的影响,改为采用 Composite Layup 模块进行内外基体层与纤维增强层的建模,构建 4 层(内外层 TPU,以及 2 层纤维增强层)。铺设角度对于 TPU(各向同性材料)

无影响,故设置为  $0^\circ$ 。Kevlar 芳纶纤维与 TPU 材料参数参考表 4<sup>[16]</sup>。

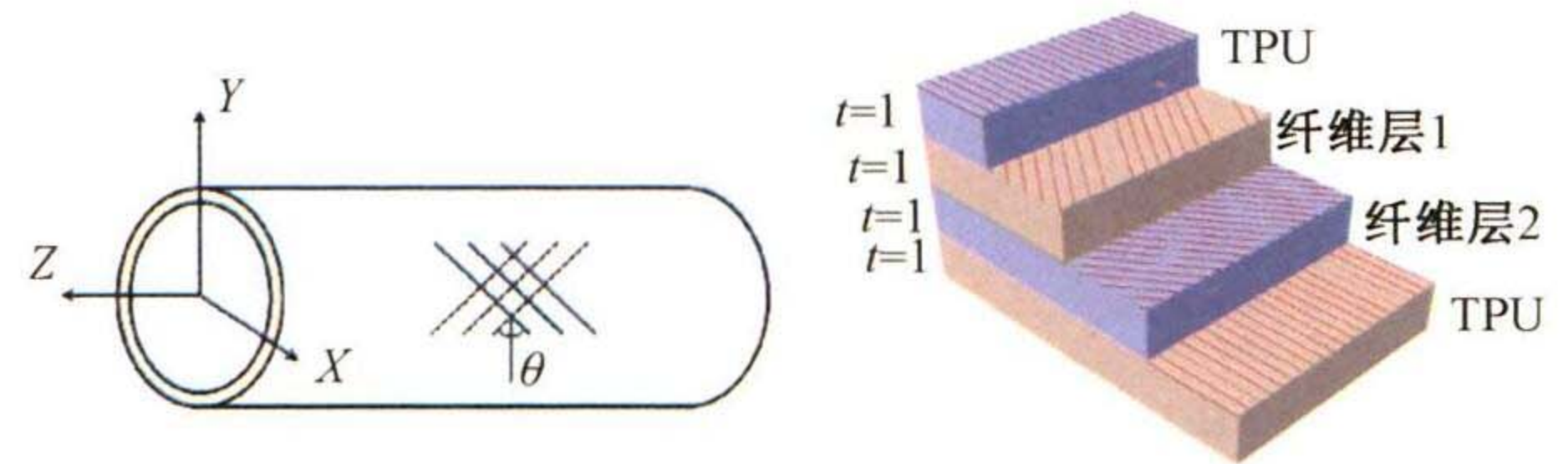


图 9 纤维铺设角度示意图与铺层模型

Fig. 9 Schematic diagram of fiber laying angle and lay-up model

表 4 软管材料性能参数取值

Tab. 4 The values of performance parameters for hose materials

材料	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	拉伸弹性 模量 /MPa	抗拉 强度 /MPa	断裂 伸长率 /%	弹性 极限 /%	塑性 极限 /%
Kevlar 29	1.44	70 300	2 920	3.6	3.6	—
TPU	1.12	30	45 640	20	200	200

不同组别的软管内外 TPU 基体层的环向应变值相近,以  $\theta = \pm 30^\circ$  为例(见图 10),内、外基体层的最大应变值分别出现在起拱线与管顶位置,分别为 3.33%、5.39%,均远小于 TPU 材料的塑性形变极限。不同铺设角度下纤维增强层的环向应力如图 11 所示,均在折叠完成后的管顶处出现最大应力,且随着角度的减小,增强层的环向应力增大,当  $\theta$  由  $\pm 70^\circ$  减小到  $\pm 30^\circ$  时,最大应力由 144.71 MPa 增加至 444.05 MPa,但均远小于 Kevlar 纤维的抗拉强度。随着角度的减小,增强层与基体层的界面张拉应力也有所增大,说明铺设角度也会影响软管受弯时的层间粘合性能。

然而,通过上述结果认定纤维铺设角度越大、软管结构性能越好是不严谨的。在修复完成后,内衬

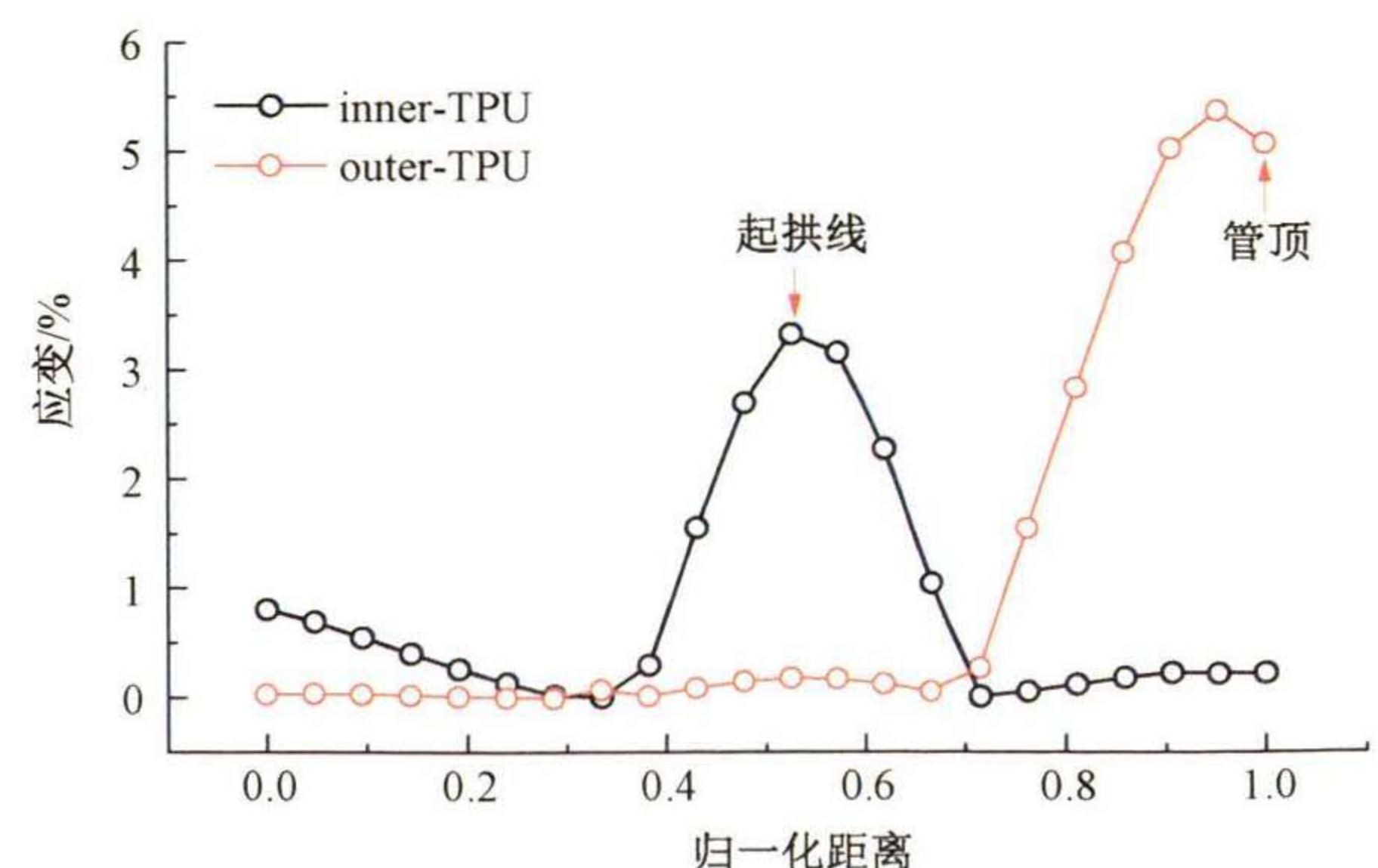


图 10 折叠过程中 TPU 基体层环向应变( $\theta = \pm 30^\circ$ )

Fig. 10 Circumferential strain of the TPU base layer during the folding process( $\theta = \pm 30^\circ$ )

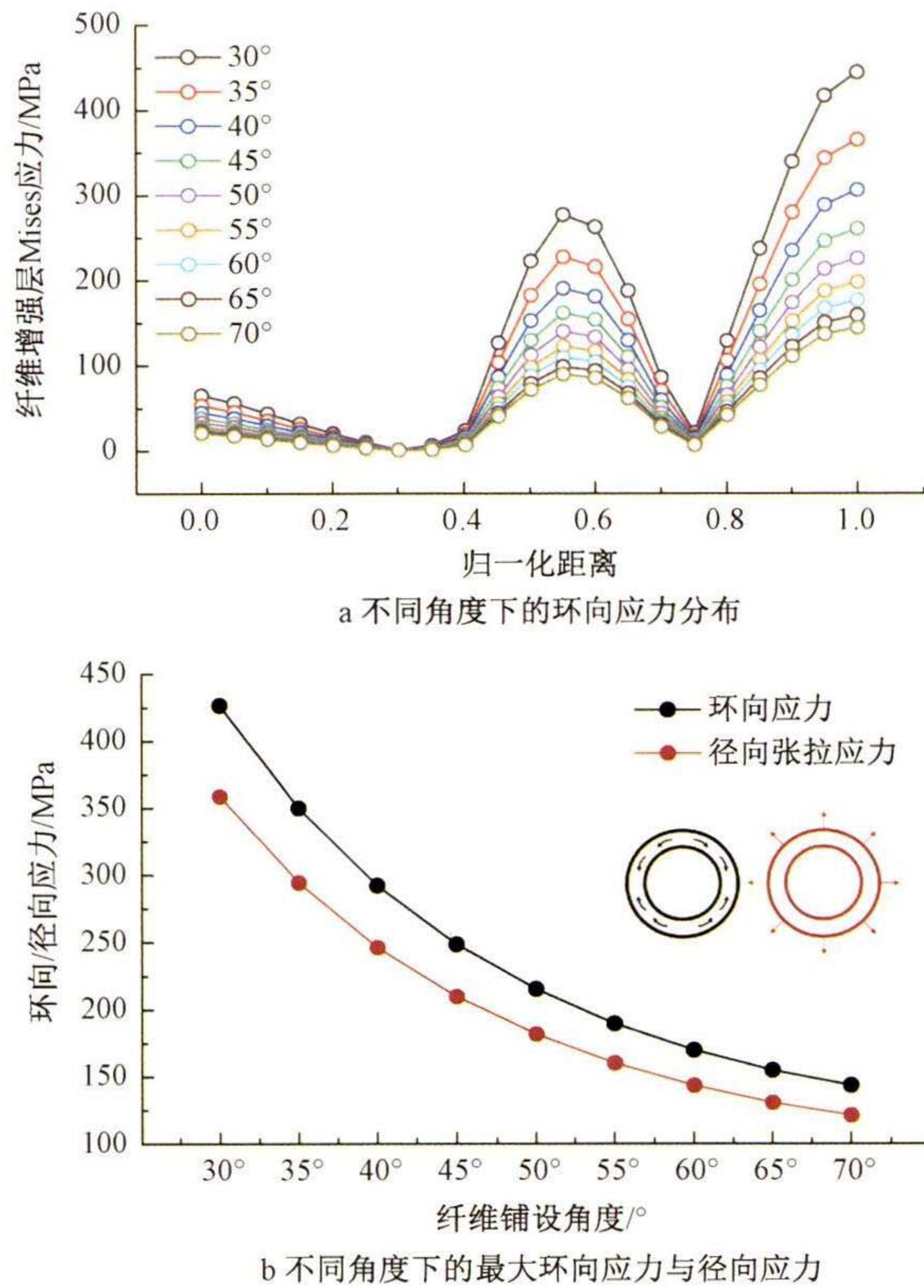


图 11 不同纤维铺设角度下增强层的环向与径向应力  
Fig. 11 Circumferential and radial stresses of the reinforcing layer under different fiber laying angles

管可能处于复杂的荷载条件下,除了前文提到的简单工况(拉伸、压缩、弯曲、拉伸-弯曲、压缩-弯曲等)之外,在既有压力管道的结构薄弱处,内衬的受力特性更加复杂。因此,纤维铺设角度的选择应综合考虑其在多种工况下的力学响应。

### 3 纤维增强复合软管穿插过弯力学行为

在折叠内衬法施工过程中,软管的牵引过弯是关键环节,直接决定修复工程的成败,而牵引力的大小与过弯角度、过弯半径紧密相关,不合理的牵引力会导致软管变形、损伤,中断施工、造成经济损失。探究过弯角度、半径与牵引力之间的内在关系,对于优化施工工艺、提高施工效率、保障修复质量具有重要意义。

#### 3.1 有限元模型

模型包括软管、既有钢管和牵引缆索三部分构成,考虑了重力荷载以及软管外表面与钢管内表面之间的摩擦力(图 12)。牵引缆索采用三维桁架单元(T3D2)进行建模,但未纳入接触相互作用设置,

以便单独分析衬管的拉力响应。牵引方向严格沿管道轴线,不考虑扭转效应。考虑 30°、45°、90° 三种过弯角度  $\alpha$ ,以及 1~4 倍  $D$ (既有管道管径)的过弯半径  $R'$ 。软管外表面与钢管内表面之间的接触摩擦系数设定为 0.4。为更加贴合实际牵引速度,采用动力隐式求解方式,以准静态牵引速度完成计算。

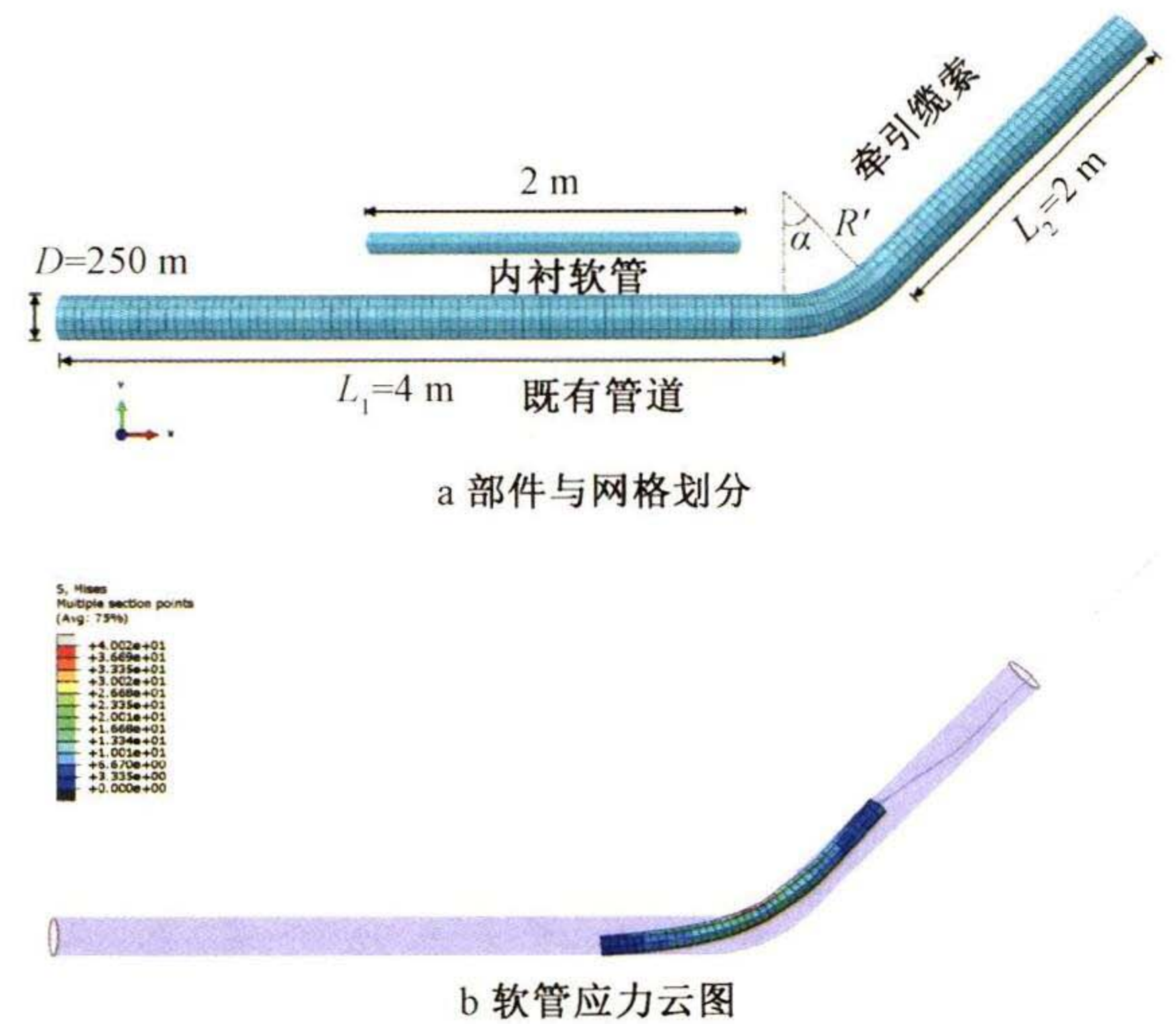


图 12 软管牵引过弯数值模型( $\alpha=45^\circ, R'=3D$ )  
Fig. 12 Numerical model of hose traction bending

#### 3.2 过弯角度与半径对内衬软管牵引力的影响

所有组别的牵引力随牵引距离变化情况如图 13 所示,过弯过程均可分为 3 个阶段:第 1 阶段,软管经缆索牵引至弯道入口处,软管端部及前部与既有管道接触并开始过弯,阻力迅速上升达到峰值;第 2 阶段,软管中部及后部开始过弯,阻力有所下降并趋于平稳;第 3 阶段,软管末端通过弯道,阻力降至较低水平。

总体上,牵引力峰值与过弯角度呈正相关,与过弯半径呈负相关(表 5)。过弯半径同为  $1D$  时,90° 过弯时的牵引力较 30° 时提升了 328.81%。当  $\alpha=90^\circ$ ,过弯半径由  $4D$  减小到  $1D$  时,牵引力峰值提升幅度为 69.80%、206.55%、428.57%;当  $\alpha=30^\circ$ ,过弯半径由  $4D$  减小到  $1D$  时,牵引力峰值提升幅度为 -6.60%、14.30%、181.47%,说明随着过弯角度的减小,牵引力峰值随着过弯半径减小而增大的幅度有所降低。除了过弯角度较大、过弯半径较小时(如  $\alpha=90^\circ, R'=1D$ )软管最大应力(41.09 MPa)略接近于管材抗拉强度(49.63 MPa)以外,其余组别均远远小于管材的抗拉强度(图 14)。在修复复杂

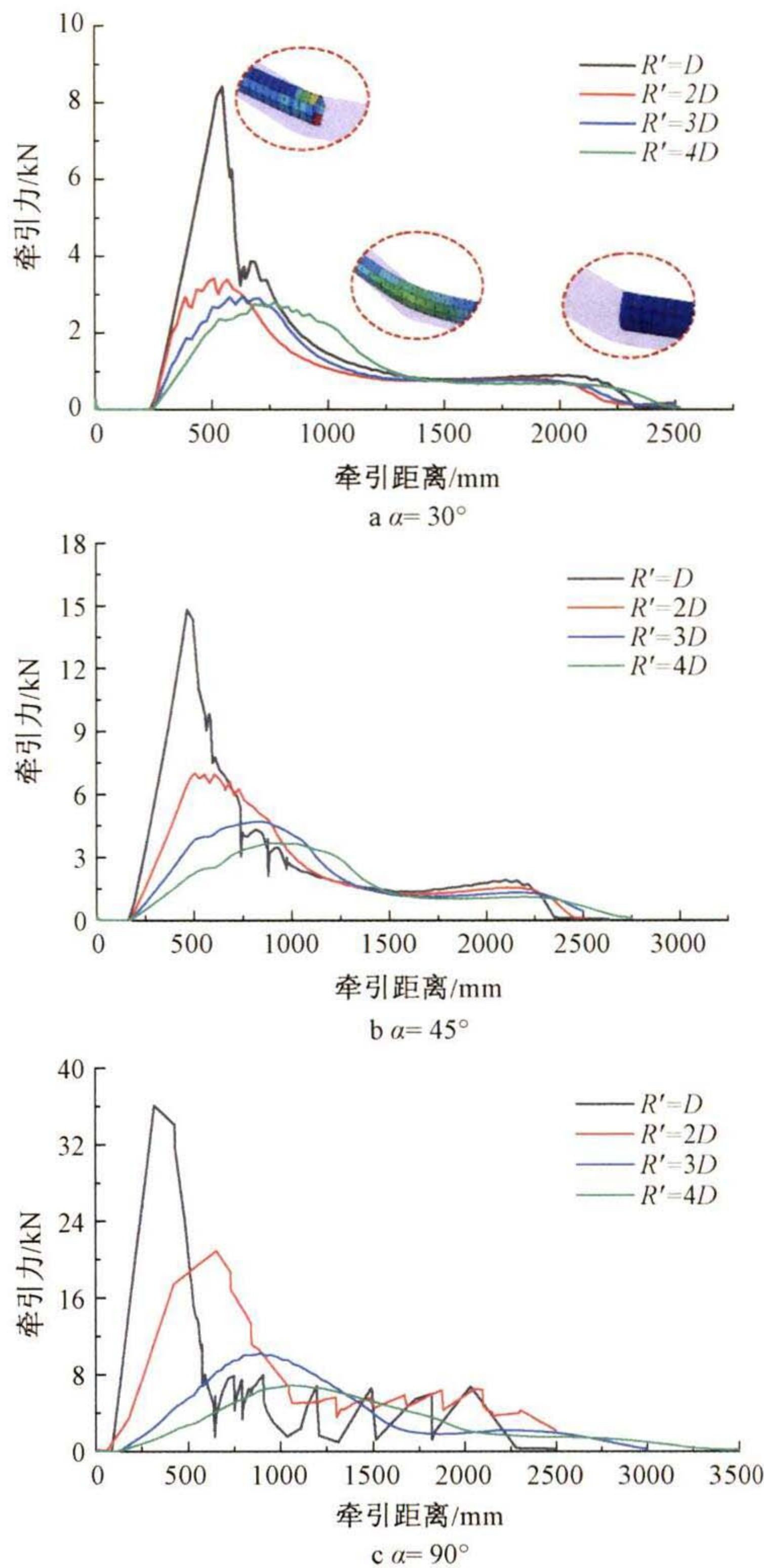


图 13 不同过弯角度下软管牵引力—牵引距离

Fig. 13 The curves of hose traction force—traction distance under different bending angles

表 5 不同过弯角度与半径下的最大牵引力

Tab. 5 The maximum traction force under different cornering angles and radii

过弯角度/ $^{\circ}$	过弯半径 $R'$	最大牵引力 $T_{max}/kN$	$T_{max}$ 提升幅度/%
30	1D	8.40	181.47
	2D	3.41	14.30
	3D	2.78	-6.60
	4D	2.98	
45	1D	14.79	310.05
	2D	6.99	93.67
	3D	4.65	29.05
	4D	3.60	
90	1D	36.02	428.57
	2D	20.89	206.55
	3D	11.57	69.80
	4D	6.81	

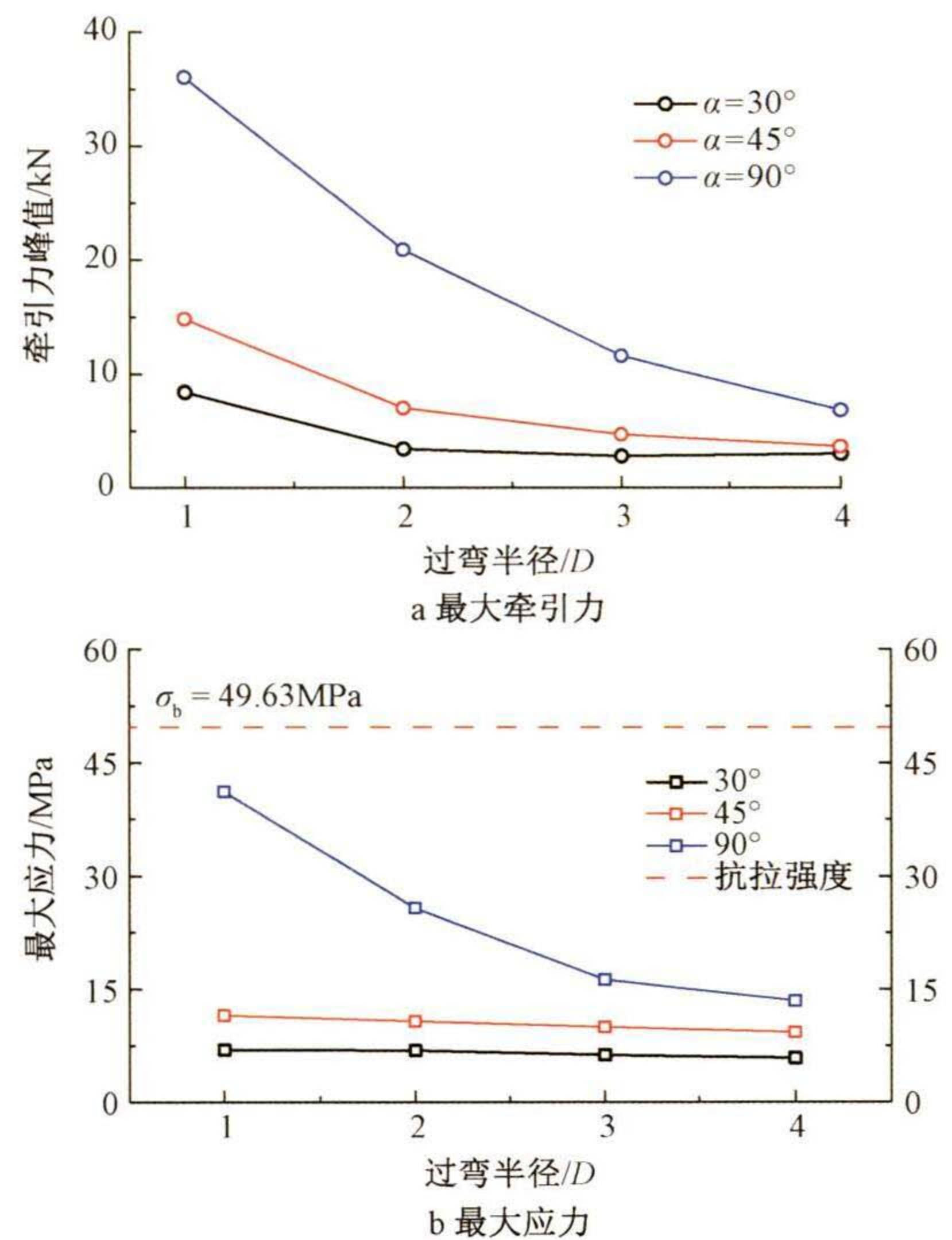


图 14 不同过弯半径下软管牵引力峰值与最大应力

Fig. 14 Maximum traction force and stress of the hose under different bending radii

管线时(如弯道角度大、半径小,或弯道较多)需采取高效减阻措施,以保证内衬软管的结构安全与修复质量。

#### 4 结论

本文通过拉伸试验建立非线性有限元模型,研究了纤维增强内衬软管在折叠、穿插、膨胀复圆过程中的力学行为,得到以下结论:

(1)纤维增强复合软管的应力—应变曲线分三个阶段。初始阶段符合胡克定律,第二阶段局部纤维断裂导致斜率减小,第三阶段材料断裂。其抗拉强度为 49.63 MPa、拉伸弹性模量为 716.81 MPa,芳纶纤维与 TPU 层共同作用,使材料具备足够的强度与变形能力,可克服传统 HDPE 管材施工作业面积需求大、弯曲半径较大等局限性,适用于折叠内衬法修复技术。

(2)折叠内衬法施工中,内衬软管在压平、折叠阶段,管顶应力较大。加压阶段,缠绕带断裂时管顶应力达最大值,断裂后应力逐渐降低。纤维铺设角度会影响增强层应力与层间粘合性能,选择时需综合考虑多种工况。



(3)过弯工况模拟显示,软管牵引过弯过程分三个阶段,牵引力峰值与过弯角度正相关(90°较 30°提升 329%)、与半径负相关(1D 较 4D 提升 428%),但软管最大应力小于抗拉强度。在对过弯角度较大、过弯半径较小,或弯头数量较多的管线进行修复时,需采取减阻措施保障软管安全与修复质量。

(4)纤维增强内衬软管在供水管网修复中有应用潜力,但在实际应用时,需依据管道工况、受力特点设计软管结构,并采取有效的减阻措施,实现高效修复高龄供水管道的目标。

### 参考文献

- [1] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [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] 甘帅,陈辉虎,陈敏,等. 城镇排水管网非开挖修复技术研究与应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22): 147-152, 158.
- [4] 张海丰,何春良,马保松,等. 纤维增强塑料软管修复供水管道承压特性分析[J]. 给水排水, 2025, 51(1): 146-152, 159.
- [5] 张伟. 供水管网的老化问题及其更新改造技术分析[J]. 中国设备工程, 2025, (13): 210-212.
- [6] 王娴. 穿插软管内衬工艺在供水管网更新改造中的应用[J]. 城镇供水, 2025, (3): 41-46.
- [7] LUO Z, YAN X. Experimental Study on Quick-Locking Reinforcement Model for Local Defects in Pipelines in the Rich Water Area[J]. Engineering Reports, 2025, 7(1): e13037.
- [8] LU H, WU X, NI H, et al. Stress analysis of urban gas

pipeline repaired by inserted hose lining method[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 183.

- [9] BARSOUM I, DYMOCK J, WALTERS R, et al. Finite-element analysis of the installation process of a novel corrosion protective Kevlar-reinforced flexible composite liner[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2018, 9(4).
- [10] XI D, ZOU X, LU H, et al. Construction Traction Prediction for Long-Distance Pipeline Repair Using Lining Hose [M]. Pipelines 2024. 185-193.
- [11] 于庆龙. 复合软管内穿插修复技术在油田的适用性研究[J]. 石油石化节能, 2023, 13(8): 35-39.
- [12] 艾龙,沈义俊. 玻纤增强柔性管结构敏感性研究与数值分析[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(1): 78-86.
- [13] 姚璐,王树青,何文涛,等. 海洋玻纤增强热塑性柔性管的理论与数值分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 141-148.
- [14] GB/T 3982. 11-2025 地下供水管网非开挖修复用塑料管道系统 第 11 部分:软管穿插内衬法 [S].
- [15] GB/T 1447-2005 纤维增强塑料拉伸性能试验方法 [S].
- [16] 刘羽熙,陈玉,刘少柱,等. 可折叠热塑性复合材料接头的力学性能[J]. 材料工程, 2024, 52(11): 41-49.

§ 通信作者:黄胜,男,1992 年出生,福建三明人,博士,副教授。主要研究方向为地下管道非开挖安装、更新以及修复技术研究与应用。

E-mail:huangsh98@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2025-04-24

### 北京市监局近日发布 6 项绿色低碳地方标准

近日,北京市市场监督管理局发布了 6 项绿色低碳地方标准,涉及碳排放、能源消耗限额、资源循环利用和能源计量体系建设等关键领域。

在碳排放方面,制定《产业园区规划环境影响评价技术指南 碳排放》,结合产业园区规划与碳排放管理的特点,明确了碳排放评价指标构建、碳排放核算与分析、减污降碳措施等技术要求。在能耗限额方面,修订《白酒单位产品能源消耗限额》《合成洗涤剂单位产品能源消耗限额》,新标准聚焦白酒和合成洗涤剂生产企业能源消耗的

计算、控制和管理。在循环利用方面,制定《污泥产品矿山土壤重构利用技术规范》,规定了污泥产品在矿山土壤重构过程中的利用要求、环境跟踪监测与评价、记录与存档等要求。修订《污水源热泵系统设计规范》,聚焦工程规划与勘察、污水换热系统等关键环节,新增污水源热泵系统规划等相关要求。在能源计量方面,制定《企业用能系统耦合可再生能源计量技术指南》,聚焦企业用能系统的能源计量层次、能源计量、可再生能源计量和计量数据应用等方面,明确了企业用能系统的能源计量层次。