

光纤传感器在深海采矿柔性管中的 集成方案研究*

崔新雨¹, 徐万海², 王莹莹³, 沈飞^{1,2}, 柯燎亮^{1,2}

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300350;
2. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072;
3. 中国石油大学(北京) 安全与海洋工程学院, 北京 102249)

(本刊编委柯燎亮来稿)

摘要: 针对非粘结柔性管在深海采矿服役中的健康监测需求,研究了光纤传感器与柔性管的集成工艺方案.通过设计三种集成工艺(芳纶绳及传感器缠绕、预浸带内置传感器、内衬层开槽置入传感器),结合有限元模拟分析了不同工艺参数对传感器及柔性管力学性能的影响.仿真结果表明:在芳纶绳缠绕工艺中,张紧力与缠绕角度对传感器伸长率和内衬层应力影响较小,均低于材料极限;预浸带内置方案中,张紧力及缠绕角度的变化未显著影响传感器性能;而内衬层开槽方案,在 60 MPa 爆破内压载荷下,传感器伸长率超过其极限值,存在失效风险.结合集成工艺难易程度综合评估表明,芳纶绳缠绕工艺兼具低应力、高可靠性及工艺简便性,为最优选择.研究结果为深海采矿非粘结柔性管内传感器集成提供了理论依据与工艺优化策略.

关键词: 深海采矿; 非粘结柔性管; 传感器; 集成加工; 有限元模拟

中图分类号: TH166 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.460110

Research on the Integration Methods for Fiber Optic Sensors in Deep Sea Mining Flexible Pipes

CUI Xinyu¹, XU Wanhai², WANG Yingying³,
SHEN Fei^{1,2}, KE Liaoliang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, P.R. China;
2. National Key Laboratory of Intelligent Construction and Operation of Water Conservancy Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, P.R. China;
3. School of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing),
Beijing 102249, P.R. China)

(Contributed by KE Liaoliang, Member of the Editorial Board of AMM)

Abstract: Based on the health monitoring requirements for unbonded flexible pipes in deep-sea mining operations, the integration process schemes for optical fiber sensors with flexible pipes were investigated. Three inte-

* 收稿日期: 2025-06-03; 修订日期: 2025-08-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2803703)

作者简介: 崔新雨(1998—),男,博士生(E-mail: cxy0411@tju.edu.cn);

柯燎亮(1979—),男,教授,博士,博士生导师(通信作者. E-mail: llke@tju.edu.cn).

引用格式: 崔新雨, 徐万海, 王莹莹, 沈飞, 柯燎亮. 光纤传感器在深海采矿柔性管中的集成方案研究[J]. 应用数学和力学, 2026, 47(6): 799-813.

gration processes (the aramid fiber rope and sensor winding, the pre-impregnated tape with embedded sensors, and the lining grooving for sensor placement) were designed, and the effects of different process parameters on mechanical performances of sensors and flexible pipe structures were analyzed through finite element simulations. Simulation results indicate that, in the aramid fiber rope winding process, variations of the tension force and the winding angle minimally affect sensor elongation rates and inner liner layer stresses, both below material limits. For the pre-impregnated tape embedding scheme, changes of the tension force and the winding angle do not significantly compromise the sensor performances. For the lining grooving solution, under an internal burst pressure load of 60 MPa, the sensor elongation rate exceeds its limit, posing a risk of failure. A comprehensive evaluation demonstrates that, the aramid fiber rope winding process offers low stress, high reliability, and process simplicity, making it the optimal choice. This research provides a theoretical foundation and a process optimization strategy for sensor integration of deep-sea flexible pipes.

Key words: deep-sea mining; unbonded flexible pipe; sensor; integration process; finite element simulation

0 引 言

随着陆地矿产资源日益枯竭,深海矿产资源(如多金属结核、富钴结壳、热液硫化物等)开发成为全球能源战略的重要方向^[1].然而,深海环境具有高压、低温、强腐蚀性及复杂流体载荷等特点,对采矿装备的可靠性和耐久性提出了严峻挑战^[2].深海采矿系统主要由以下核心模块构成:海底采矿车、输送软管、浮力调节系统、中继仓、垂直提升管道、大功率提升泵及水面采矿船等协同作业单元^[3].作为核心运输载体的深海输送软管,依据结构特性可分为粘结型柔性管与非粘结型柔性混输管两大类.其中,非粘结柔性混输管凭借其独特的层间非粘接结构设计,展现出显著的技术优势,不仅具备超强的动态弯曲性能和优异的抗水压冲击能力,其模块化设计更便于深海复杂地形中快速安装与维护^[4].其内部独特的复合结构设计(如多层增强层、抗压骨架层及外覆防护层)使其能够在极端工况下保持优异的力学性能和稳定性^[5-6].然而,柔性管在长期服役过程中不可避免地发生形变、疲劳损伤甚至泄漏,一旦失效将导致严重的经济损失和生态风险^[7-9].因此,实时监测柔性管的力学状态与环境参数,成为保障深海采矿系统安全运行的核心需求^[5,10].

光纤传感器以其抗电磁干扰、高灵敏度、多参数同步监测及长距离分布式感知等优势,成为深海装备健康监测的理想选择^[11].Cao等^[12]提出了一种基于MEMS-IMU的海底电缆监测方法,通过合理布置传感器并结合弧形模型,实现了对电缆形状、位移和扭转精确监测,为海底电缆安全运行提供了技术支持.Khulief等^[13]开发了一种基于管道内声学测量的泄漏检测技术,利用水听传感器捕捉管道泄漏信号,实现管道的健康监测.Tan等^[14]研究了一种嵌入式海洋光电复合成形电缆的设计与制备,重点在于通过光纤布拉格光栅(FBG)传感器实现对电缆形状实时监测.Tanimola和Hill^[15]研究了光纤分布式传感技术在管道泄漏中的应用.Tan等^[16]提出了一种新的方法和模型,利用分布式光纤传感器对管道的弯曲和凹痕进行监测和评估,用以监测服役过程中的管道结构变形.Ren等^[17]设计并封装了一种FBG环向应变传感器,用于测量管道的环向应变变化.Chatzigeorgiou等^[18]讨论了一种新型管道泄漏检测传感器的设计与实现,通过在管道特定位置安装力传感器,利用泄漏产生的力变化来间接检测管道中的泄漏或缺陷,避免了直接测量泄漏压力梯度.

针对深海采矿柔性管中传感器的研究,主要关注柔性管动态服役过程的健康监测,通过集成光纤传感、声学感知与智能算法,实现对管道动态服役过程中的应变分布、弯曲形变、局部损伤(如裂纹/凹痕)的实时追踪与评估,为深海复杂工况下管道的安全预警和寿命预测提供解决方案.然而,现有研究较少考虑传感器和柔性管的集成加工工艺以及加工制造过程中机械载荷对传感器性能的潜在影响,针对传感器与柔性管的集成方案设计及其集成工艺对传感器灵敏度和长期可靠性的影响规律,仍存在显著研究空白.集成加工工艺对保障传感器功能至关重要,柔性管通常采用多层复合结构,传感器的嵌入需根据不同柔性管结构进行配合.现有文献虽对柔性管制造工艺开展了一些研究^[19],但大多研究集中在主要承载结构的制造工艺方面,未考虑传感器集成过程对传感器力学性能的影响.

因此本文以深海采矿非粘结柔性管为研究对象,利用有限元方法对三种集成加工工艺进行数值模拟,重点研究集成加工工艺过程对传感器力学性能的影响规律,并根据计算结果,评估各方案集成加工工艺的工程

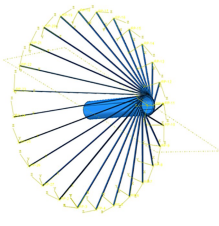
适用性.本文结构如下:第 1 节阐述三种传感器集成工艺方案的设计原理与实施流程;第 2 节建立三种集成加工工艺的有限元模型,详细描述几何参数、材料本构及边界条件设置;第 3 节通过仿真计算分析关键工艺参数的影响规律,并评估各方案的工程适用性;第 4 节综合讨论三种工艺的优劣;第 5 节是全文主要结论。

1 传感器与柔性管集成工艺方案

非粘结柔性管的结构一般包括:内衬层、补偿层、骨架层、抗拉增强层、外覆层等.基于柔性管层间非粘结的力学解耦特性,传感器集成需根据传感器功能和各层的结构特性进行动态适配.本文主要针对三种集成加工方案进行分析,分别为芳纶绳及传感器集成缠绕工艺方案、传感器内置预浸带缠绕工艺方案和内衬层开槽内置传感器方案,如表 1 所示。

表 1 传感器与柔性管复合集成加工成型方案

Table 1 Integrated processing and forming methods for the sensor and flexible tube composite

integrated processing solution	sensor placement location	processing and molding method	processing diagram
method I : integrated winding process of aramid ropes and sensor ropes	the sensor is located in the compensation reinforcement layer	the compensation reinforcement layer is fabricated by winding aramid ropes and sensor ropes together	
method II : pre-impregnated tape winding process with built-in sensor	the sensor is located in the compensation enhancement layer	the aramid fibers and sensors are impregnated with glue to form a pre-impregnated tape and wrapped around the lining to form the compensation reinforcement layer	
method III : lining slotted with built-in sensor	the sensor is located inside the groove of lining	groove the outer surface of the lining and place sensors	

1.1 方案 I : 芳纶绳及传感器集成缠绕工艺

本方案的柔性混输管主要包括内衬层、补偿增强层 1、补偿增强层 2、骨架层等.其中内衬层由超高分子量聚乙烯构成,主要承担矿浆输送与防渗透功能;补偿增强层主要承担对管道抗拉伸性能的补偿作用;光纤传感器嵌入补偿增强层内部.这种布置方式具有双重优势:一方面,补偿增强层所处的中层位置既紧邻内衬层,便于直接感知内衬层的应变、压力及介质渗透等参数变化,从而显著提升监测的灵敏度;另一方面,该结构设计为传感器提供了天然的保护屏障,有效隔离外部机械应力对光纤的直接冲击,大幅降低了光纤在复杂工况下的性能衰减风险。

柔性管与传感器的集成方案是利用缠绕机将传感器绳束与芳纶绳同时缠绕到内衬层上形成补偿增强层.为了在实际工况中有效监测管道内部是否发生泄漏,柔性管设计时采用了三种不同类型的传感器,分别用于测量管道内部的变形、温度和盐度,因此布置了 4~8 条传感器,确保能够全面监控柔性管在使用过程中的状态变化.由于传感器直径(2.5 mm)与芳纶绳直径(3 mm)不同,因此在传感器外部缠绕一层芳纶纤维生成传感器绳束,起到保护光纤作用的同时保证芳纶绳和传感器绳束直径一致。

1.2 方案 II : 传感器内置预浸带缠绕工艺

本方案采用预浸带缠绕工艺实现光纤传感器与柔性管的集成设计.柔性管采用多层非金属复合结构,与

方案 I 相同,但在内衬层与补偿增强层中间加入了抗内压增强层.其中抗内压增强层由连续长纤维复合材料制成,用于抵抗内部高压载荷;光纤传感器布设于补偿增强层内,具体嵌入第一层预浸带之间,通过芳纶纤维与环氧树脂基体形成的预浸带包裹固定.

在工艺实施中,传感器集成过程分为三步:首先,将光纤传感器平行排列于预浸带芳纶纤维层间,利用树脂固化实现界面粘结;其次,采用缠绕机将含传感器的预浸带及其他预浸带以一定螺旋角逐层包覆在抗内压增强层外表面.这种方案的优势在于,传感器深埋于补偿增强层内部,避免了外部机械损伤与腐蚀,预浸带的高模量特性有效分散了传感器周围的应力集中.

1.3 方案 III:内衬层开槽内置传感器

本方案通过在内衬层开槽并内置光纤传感器实现集成,柔性管结构与方案 I 相同.集成工艺实施包括:采用精密铣削技术在内衬层外表面加工螺旋槽道,槽道间距根据传感器布局需求设计;将光纤传感器嵌入槽道,通过真空注胶工艺注入热熔胶,固化后形成连续封装层.该方案的优势在于,传感器直接接触内衬层表面,可精准监测管道内部应变与温度分布并且热熔胶封装工艺简单,成本较低.

2 传感器与柔性管集成工艺模型

2.1 方案 I:芳纶绳及传感器集成缠绕工艺有限元模型

传感器缠绕工艺仿真模型的几何尺寸如表 2 所示.为了聚焦于柔性管与传感器集成加工过程,所建立的模型仅包含与加工过程相关的结构单元.该模型主要由柔性管的内衬层、芳纶绳、光纤传感器绳束及导向环组成,如图 1 所示.其中绿色部分为内衬层,灰色线条为芳纶绳,红色线为传感器绳束(主要由传感器和外包覆的芳纶纤维组成),蓝色部分为导向环.补偿增强层是通过芳纶绳及内部的传感器绳束缠绕形成,其中芳纶绳和传感器绳束的总数量保持为 170 根,两层补偿增强层总计 340 根,缠绕角度范围设定在 35° 至 60° 之间.材料参数如表 3 所示.

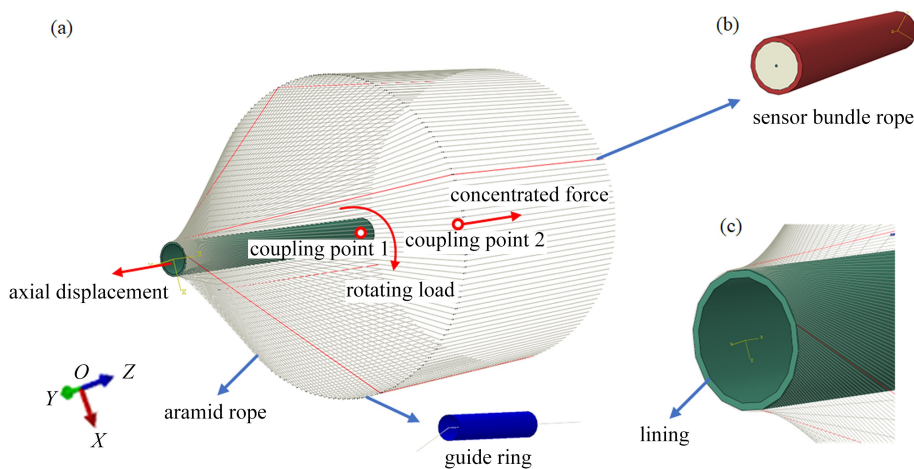


图 1 传感器缠绕工艺几何模型

Fig. 1 The simulation model of integrated processing technology for sensors and flexible pipes

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同.

在传感器工艺仿真建模过程中,芳纶绳和传感器绳束的力学行为通过杆单元模拟.由于传感器绳束由多个部分组成,因此需要计算等效材料参数或者实验的方法获得材料参数,以便在仿真中准确反映其整体力学响应^[20].通过实验方法^[21-23]获得了传感器的轴向弹性模量 362 MPa.传感器绳束采用杆单元模拟,我们只考虑其轴向,因此等效材料轴向弹性模量及 Poisson 比计算公式为^[24-25]

$$E = E_a c_a + E_b c_b, \quad (1)$$

$$\nu = \frac{K_a \nu_a c_a + k_b \nu_b c_b}{k_a c_a + k_b c_b}, \quad (2)$$

其中, E 为弹性模量, ν 为 Poisson 比, c 为体积分数, K 为体积模量, a 和 b 代表两种传感器和芳纶纤维。

内衬层作为深海采矿非粘结柔性管的核心功能层,采用改性超高分子量聚乙烯通过挤出成型工艺制备。在有限元仿真中,采用八节点线性六面体单元表征其各向同性力学行为。

在实际加工过程中,内衬层沿着管路轴向移动,导向环带动所有芳纶绳旋转,从而实现缠绕。在传感器缠绕工艺仿真模型中,模型各部分的接触采用通用接触实现,摩擦因数设置为 0.2。在图 1 中,设置所有芳纶绳及传感器绳束的右端点耦合到耦合点 2 处,并施加集中力,模拟缠绕过程中对芳纶绳和传感器绳束的牵引力,将所有导向环耦合到耦合点 1 处,施加旋转载荷,同时在柔性管前端施加位移,缠绕角度通过柔性管管体的轴向位移速度以及导向环的旋转速度共同控制。为了深入分析工艺参数对集成加工过程中的传感器受力状态的影响,选取一定的工艺参数范围^[26]进行数值计算研究,如表 4 所示。

表 2 传感器缠绕工艺仿真模型各结构尺寸

Table 2 Structural dimensions of the sensor and flexible tube integrated processing process simulation model

structure name	component	material	size	value/mm	number	helix angle/(°)
lining	-	-	inside diameter	200	1	-
			outside diameter	224		
compensation reinforcement layer 1	sensor cable bundle	optical fiber	diameter	2.5	2,4,6	35,45,54
		outer sheath	outside diameter	0.125		
	aramid rope	aramid fiber	thickness	0.25	168,166,164	35,45,54
		aramid fiber	diameter	3		
compensation reinforcement layer 2	sensor cable bundle	optical fiber	diameter	2.5	0	-35,-45,-54
		outer sheath	outside diameter	0.125		
	aramid rope	aramid fiber	thickness	0.25	170	-35,-45,-54
		aramid fiber	diameter	3		

表 3 内衬层和补偿增强层材料参数

Table 3 Material parameters of the inner lining layer and compressive reinforcement layer of the prepreg

structure	material	elastic modulus/MPa	Poisson's ratio	limiting performance
lining	modified ultra-high molecular weight polyethylene	536.2	0.41	ultimate strength 20 MPa
aramid rope	aramid fiber ^[27]	17 100(axial)	0.3	ultimate strength 960 MPa
sensor bundle rope	SiO ₂ ^[27]	9 867(axial)	0.3	ultimate elongation 2.8%
	high molecular weight polyethylene aramid fiber			

表 4 工艺参数设置

Table 4 The process parameter setting

process parameter	value
tension force/N	20,30,50
winding angle/(°)	35,45,54

2.2 方案 II: 传感器内置预浸带缠绕工艺有限元模型

本设计方案将光纤放置于补偿增强层之中,其中补偿增强层是由截面为矩形的预浸带缠绕而成,缠绕厚度为 6 mm。在靠近抗压增强层的补偿增强层中,内置了一根光纤,光纤的直径为 2 mm。为了进行后续的仿真工作,我们需要建立包括内衬层、加强层以及内置有一条光纤的预浸带模型,结构尺寸如表 5 所示,所建立的缠绕模型如图 2 所示。图 2 中绿色部分为内衬层,黄色部分为抗内压增强层,蓝色部分为预浸带,红色部分为传感器。

预浸带缠绕模型中的内衬层和内压增强层均被简化为各向同性材料,采用八节点线性六面体单元模拟,具体参数如表 6 所示。预浸带材料为芳纶纤维与树脂的混合材料,由于对预浸带内部的芳纶纤维建模十分复

杂,因此假设预浸带材料为各向异性材料,计算混合材料的等效材料参数.

表5 预浸带缠绕模型各结构尺寸

Table 5 Dimensions of each structure in the pre impregnated tape winding model

structure	material	inside diameter/mm	outside diameter/mm	thickness/mm	helix angle/(°)
lining	ultra high molecular weight polyethylene	200	224	12	-
pressure armor layer	continuous long fiber composite material	224	230	3	80
compensation enhancement layer 1	continuous long fiber reinforced composite material	230	242	6	35,45,54
compensation enhancement layer 2	continuous long fiber reinforced composite material	242	254	6	-35,-45,-54

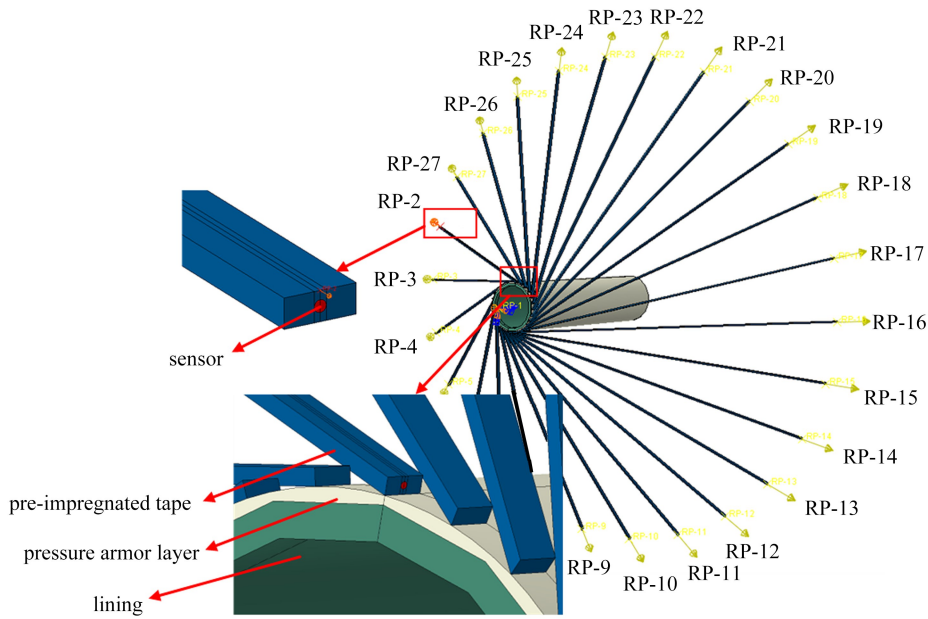


图2 预浸带缠绕模型

Fig. 2 The pre-impregnated tape winding model

表6 预浸带内衬层和抗压增强层材料参数

Table 6 Material parameters of the pre-impregnated lining and compressive reinforcement layer

structure	material	elastic modulus/MPa	Poisson's ratio	performance limit
lining	modified ultra-high molecular weight polyethylene	536.2	0.41	ultimate strength 20 MPa
pressure armor layer	continuous long fiber composite material	33 700	0.3	-
sensor	silicon dioxide outer cladding	362	0.3	maximum elongation rate 2.8%
		9 476.5 (E_{11}), 679 (G_{12})	0.34 (ν_{12})	
pre-impregnated tape	aramid fiber resin	2 156.5 (E_{22}), 711 (G_{23})	0.34 (ν_{13})	-
		2 167.9 (E_{33}), 718 (G_{31})	0.5 (ν_{23})	

采用 Ansys Workbench 中的 Material Designer 模块计算预浸带混合材料的等效参数.建立混合材料的结构模型,设置内部芳纶纤维占比为 80%,芳纶纤维直径为 5 μm .在模型中,预浸带与圆筒表面相切,而且仅有一侧与圆筒表面发生接触,假设摩擦因数为 0.5.在远离圆筒端的预浸带施加了集中力,其方向与预浸带截面

法线平行,用于模拟缠绕过程中对预浸带的牵引力,如图 2 所示.同时,我们对圆筒结构施加了旋转载荷,给定缠绕速度,缠绕工艺参数见表 7.这一模拟方案的设计旨在充分考虑缠绕过程中各种因素,以更真实地模拟和分析结构的力学响应.

表 7 缠绕工艺参数设置

Table 7 Winding process parameter settings

process parameter	process interval
winding tension/N	[50, 300]
winding speed/(r/min)	[0.25, 2]

2.3 方案 III: 内衬层开槽置入传感器有限元模型

由于本方案的工艺过程为通过在内衬层开槽,然后放入传感器,此过程对传感器的影响很小,但是由于内衬层开槽对其力学性能的影响较大,因此本方案没有对开槽置入传感器过程仿真,而是对成型后的整体管道进行拉伸和内压工况下的仿真,研究内部内衬层和传感器的力学响应.

本方案柔性管结构与方案 II 的结构相同,仿真模型包括内衬层、传感器、热熔胶结构等.传感器有八条,包括两条分布式应变传感器,一条点式盐度传感器,五条分布式传感器,其中两条分布式应变传感器的直径为 2 mm,其余六条传感器为 5 mm,传感器螺距为 525 mm,结构几何尺寸参数如表 8 所示.对应的内衬层上开槽深度为两条 3 mm 和六条 6 mm,螺距和传感器保持一致.建立的柔性管的整体模型及内衬层开槽模型,用来检验内置传感器的力学性能,如图 3 所示.

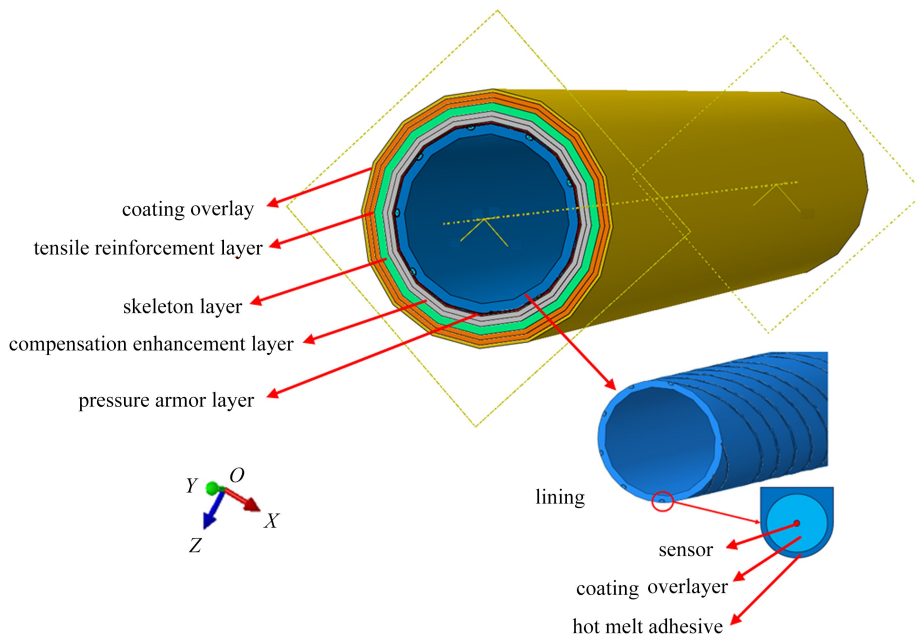


图 3 柔性管整体结构模型及内衬层开槽模型

Fig. 3 The overall structural model of the flexible pipe and the model of the lining slotting

柔性管中内衬层、抗内压增强层、传感器和补偿增强层的材料参数与方案 II 相同.剩余结构的材料参数如表 9 所示.仿真模型单元均采用 C3D8 单元建立.

由于本方案的工艺过程为将传感器嵌入内衬层,嵌入过程不会导致传感器内部产生较大的残余应力,因此重点关注管道在拉伸和内压工况下的力学性能.对柔性管整体模型施加拉伸载荷及内压载荷,拉伸载荷的边界设置为柔性管一端为完全固定约束,一端为耦合点处施加集中力 5 100 kN,如图 4(a) 所示;内压载荷边界设置为柔性管一端为完全固定约束,另一端轴向自由,其余固定约束.内衬层内壁分别设置内压载荷 20 MPa 和爆破载荷 60 MPa,如图 4(b) 所示.

表8 整体结构几何尺寸参数

Table 8 Geometric dimensional parameters of the overall structure

structure	material	inside diameter/mm	outside diameter/mm	thickness/mm	winding angle/(°)
lining	modified ultra-high molecular weight polyethylene	200	224	12	-
pressure armor layer	aramid fiber	224	230	3	80
compensation enhancement layer 1	aramid fiber	230	242	6	54
compensation enhancement layer 2	aramid fiber	242	254	6	-54
skeleton layer	fiberglass reinforced composite	254	274	10	80
tensile reinforcement layer 1	aramid fiber	274	286	6	30
tensile reinforcement layer 2	aramid fiber	286	298	6	-30
outer covering layer	polyurethane	298	306	4	-

表9 结构材料参数

Table 9 Structural material parameters

structure	material	longitudinal tensile modulus/GPa	lateral tensile modulus/GPa	in-plane shear modulus/GPa	main Poisson's ratio
outer covering layer	thermoplastic polyurethane		0.041 4		0.49
tensile reinforcement layer	aramid fiber K29+unsaturated polyester	9.94	2.55	2.37	0.34
skeleton layer	fiberglass I	33.70	7.35	2.50	0.3
hot melt adhesive	hot melt adhesive		3.2		0.3

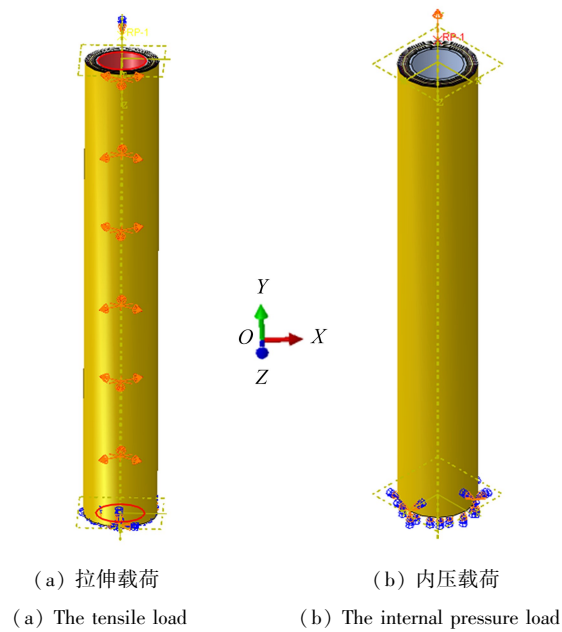


图4 边界条件设置

Fig. 4 Boundary condition settings

2.4 数值模拟方法

本文基于有限元方法建立柔性管内传感器集成工艺的数值模型,研究传感器的不同集成工艺对柔性管力学性能的影响.柔性管内材料的力学响应符合弹性力学的应力平衡方程:

$$\nabla \cdot \sigma + f = \rho \ddot{u}, \tag{3}$$

其中 σ 为应力张量, u 为位移, ρ 为材料密度, f 为体力.考虑到本文主要研究静力工况,计算中忽略惯性项.各层材料均假定为线弹性,其中内衬层为改性超高分子量聚乙烯,将其简化为各向同性材料,补偿增强层和抗压增强层采用各向异性模型,其等效力学参数由混合规则或软件计算获得,具体材料参数见表 3、表 6 和表 10.芳纶绳和传感器绳束采用杆单元建模,其他结构采用 C3D8 和 C3D4 单元计算.利用 ABAQUS/Standard 2020 平台开展数值模拟,采用静力隐式求解器,非线性因素包括接触和几何非线性.

3 计算结果

3.1 方案 I :芳纶绳及传感器集成缠绕工艺仿真结果分析

3.1.1 缠绕工艺仿真结果分析

选取缠绕角 54° 和张紧力 50 N 作为工艺条件,对传感器集成缠绕过程进行了数值模拟.仿真结果表明,传感器绳束与芳纶绳均能有效附着并缠绕于内衬层表面,其应力分布情况如图 5 所示.

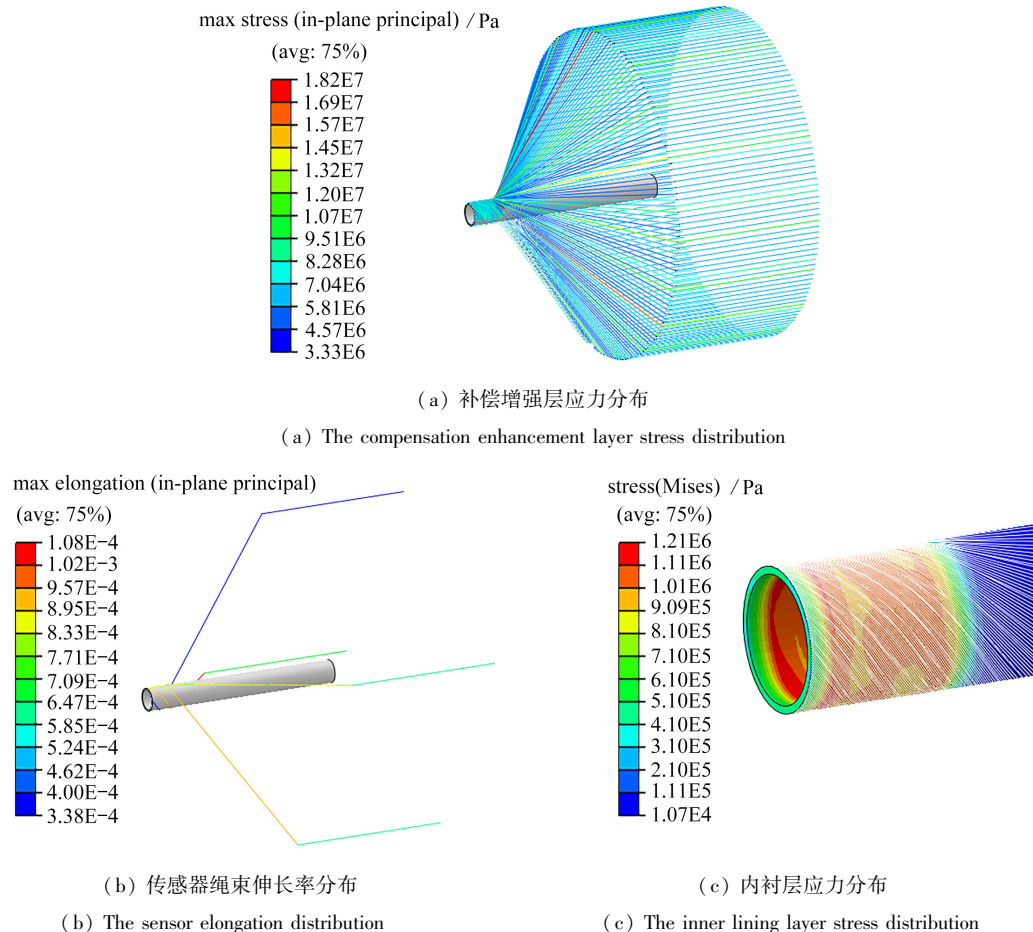


图 5 缠绕角 54° 和张紧力 50 N 时缠绕工艺仿真结果

Fig. 5 Integrated process simulation results with a winding angle of 54° and a tension of 50 N

缠绕工艺仿真结果如图 5 所示.图 5(a) 表明,补偿增强层的应力分布存在一定差异,其中芳纶绳的最大主应力为 18.2 MPa.根据图 5(b),传感器绳束的伸长率为 0.108%,远小于光纤的断裂伸长率 2.8%,说明其安全裕度较大.图 5(c) 给出了内衬层的 Mises 应力分布,其最大值为 1.21 MPa,出现在缠绕初期,随后逐渐下

降并趋于稳定,该值仍远低于内衬层的屈服强度 20 MPa。综合分析可知,在该工艺条件下,缠绕过程对补偿增强层、传感器及内衬层的影响均十分有限。

3.1.2 张紧力和缠绕角度参数对缠绕工艺的影响

补偿增强层的缠绕性能主要受张紧力和缠绕角度控制。为探讨不同工艺参数对传感器缠绕过程的影响,本文基于控制变量法开展仿真研究,以 54°为固定缠绕角度,分别考察张紧力取值 20 N、30 N 和 50 N 时传感器伸长率及内衬层应力分布的变化规律,相关结果汇总于表 10。

表 10 结果表明,缠绕张紧力越大,传感器绳束的伸长率越高,在 50 N 工况下,其最大伸长率为 0.108%,但相较于光纤的极限伸长率 2.8%仍具有较大安全裕度。与此同时,内衬层的最大 Mises 应力随张紧力增加而上升,在 50 N 时达到 1.21 MPa,依旧远低于失效强度。因此,在常用张紧力范围内,缠绕工艺对传感器及内衬层的影响可以忽略。

表 10 不同张紧力下传感器绳束伸长率及内衬层应力结果

Table 10 Sensor rope elongation and inner lining stress results under different tension forces

stress/elongation	tension force 20 N	tension force 30 N	tension force 50 N
sensor rope elongation/%	0.075 6	0.093 7	0.108 0
stress of lining/MPa	0.779	0.876	1.210
stress of aramid rope/MPa	11.0	13.7	18.2

随后,在张紧力固定为 30 N 时,进一步对比不同缠绕角度(35°,45°和 54°)对传感器伸长率和内衬层应力分布的影响,相关结果见表 11。

表 11 不同缠绕角度下传感器绳束伸长率及内衬层应力结果

Table 11 Sensor rope elongation and inner lining stress results at different winding angles

stress/elongation	winding angle 35°	winding angle 45°	winding angle 54°
sensor rope elongation/%	0.034 1	0.038 6	0.093 7
stress of lining/MPa	0.343	0.535	0.876
stress of aramid rope/MPa	6.01	6.07	13.69

表 11 结果表明,随着缠绕角度的增加,传感器光纤的伸长率有所提高,但即使在 54°时,最大伸长率仅为 0.093 7%,远低于其极限伸长率 2.8%,安全裕度充足。同时,内衬层的最大 Mises 应力亦随角度增大而升高,在 54°时达到 0.876 MPa,但与其失效强度相比仍有较大差距。因此,可以认为在 35°至 54°的缠绕角度范围内,角度变化对传感器和内衬层的影响均较小。

张紧力与缠绕角度的分析结果表明,两类工艺参数在本文研究范围内对传感器性能均不构成显著影响。

3.2 方案 II:传感器内置预浸带缠绕工艺仿真结果分析

3.2.1 缠绕工艺仿真结果分析

以缠绕角度 54°和张紧力 200 N 的工艺条件为例,分析传感器集成工艺过程的仿真计算结果。仿真结果显示预浸带缠绕于抗内压增强层表面。图 6 展示了缠绕工艺仿真完成后的计算结果,其中图 6(a)和(b)分别为内衬层应力分布和传感器伸长率结果。图 6(a)展示了缠绕过程中的内衬层最大 Mises 应力为 0.264 MPa,在缠绕初始阶段产生了一定的应力。从图 6(b)可以看出,传感器上的最大伸长率为 0.009 18,远低于传感器的断裂伸长率 2.8%。因此,尽管在缠绕初期需要关注内衬层的应力变化,但内衬层所受应力较小,远低于其屈服强度(20 MPa)。综合来看,缠绕过程对内衬层和传感器的影响极小。

3.2.2 张紧力和缠绕角度参数对缠绕工艺的影响

传感器内置预浸带缠绕工艺过程中的关键工艺参数包括张紧力和缠绕角度。因此,本研究通过分析这两种工艺参数,探讨其对传感器缠绕过程的影响规律,旨在评估这些参数是否会对传感器的缠绕过程产生显著影响。计算过程中采用控制变量法,首先研究了在传感器直径 2 mm 张紧力为 200 N 的条件下,缠绕角度分别为 35°,45°和 54°时对传感器伸长率及内衬层应力分布的影响。表 12 显示缠绕过程中在不同缠绕角度下对传

传感器伸长率的影响很小,其中传感器在缠绕过程中产生的应力在 54°时最大,达到 0.918%,远小于光纤极限伸长率 2.23%,缠绕角度的增大使传感器的伸长率呈增大的趋势,缠绕过程中光纤上产生的应力不会对光纤的力学性能产生显著影响;内衬层在不同缠绕角度下的应力结果显示缠绕过程对内衬层的影响很小,抗内压增强层的存在更进一步减小了内衬层的应力。

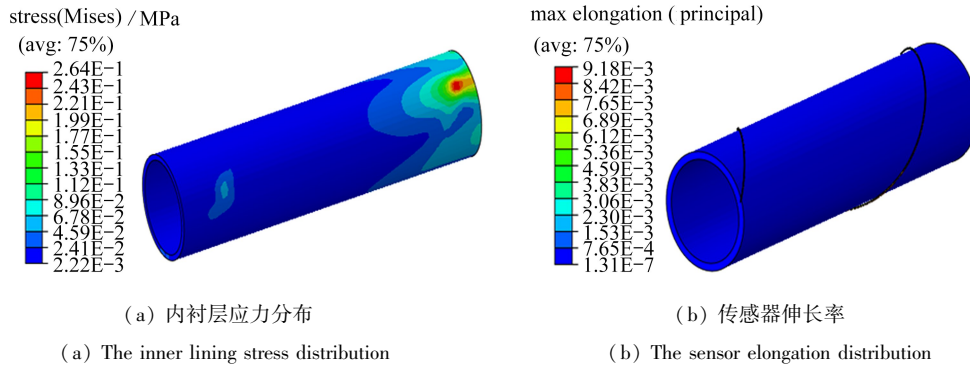


图 6 传感器直径 2 mm 缠绕角 54°张紧力 200 N 时缠绕工艺仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the winding process with a sensor diameter of 2 mm, a winding angle of 54 ° and a tension of 200 N

表 12 缠绕仿真计算不同缠绕角度光纤及内衬层应力结果

Table 12 Stress results of optical fibers and inner lining layers with different winding angles calculated by winding simulation

stress/elongation	winding angle 35°	winding angle 45°	winding angle 54°
sensor elongation rate/%	0.891	0.906	0.918
stress of lining/MPa	0.142	0.379	0.264

随后,我们继续研究了在传感器直径 2 mm 缠绕角度为 54°的条件下,张紧力分别为 200 N,250 N 和 300 N 时对传感器伸长率及内衬层应力的影响.表 13 显示缠绕过程中在不同张紧力下,对传感器伸长率的影响很小,其中传感器在缠绕过程中产生的伸长率在 300 N 时最大,达到 1.2%.张紧力的增大使传感器的伸长率呈增大的趋势,缠绕过程中传感器的力学性能不会有显著影响;内衬层在不同张紧力下的应力结果显示缠绕过程对内衬层的影响很小。

综合计算结果可见,在所设置的缠绕工艺参数范围内,缠绕角度对传感器的影响较为有限,不会对传感器产生显著影响.同样,缠绕张紧力的设置对传感器的影响也较小。

表 13 缠绕仿真计算不同张紧力光纤及内衬层应力结果

Table 13 Stress results of fiber optic and lining under different tensions calculated by winding simulation

stress/elongation	tension force 200 N	tension force 250 N	tension force 300 N
sensor elongation rate/%	0.918	0.966	1.200
stress of lining/MPa	0.264	0.277	0.283

3.3 方案 III:内衬层开槽置入传感器仿真结果分析

3.3.1 内衬层开槽置入传感器拉伸载荷仿真结果分析

在轴向拉伸载荷下内衬层结构和传感器的 Mises 应力如图 7 所示.在拉伸载荷条件下,开槽模型应力较大部位主要沿开槽路径分布,最大 Mises 应力为 15.64 MPa,小于内衬层失效强度 20 MPa.槽底部应力较小,主要原因是传感器及热熔胶承受了一定的拉力.图 7(b)的结果显示开槽模型传感器伸长率为 2.07%,尚未达到传感器的失效伸长率。

3.3.2 内衬层开槽置入传感器内压载荷仿真结果分析

在 20 MPa 和 60 MPa 内压载荷条件下内衬层结构和光纤的 Mises 应力如图 8 和图 9 所示.图 8 结果显示内衬层最大 Mises 应力达到 10.44 MPa,应力最大位置主要集中在内衬层底部,未超内衬层的失效强度 20 MPa,且传感器伸长率达到 1.39%.图 9 结果显示内衬层最大 Mises 应力达到 32.85MPa,远超内衬层的失效强

度 20 MPa, 光纤伸长率达到 4.45%, 超过传感器的极限伸长率, 因此在内压载荷为 60 MPa 时这种方案可能会出现内衬层和传感器失效, 因此不建议采用内衬层开槽置入传感器的方法.

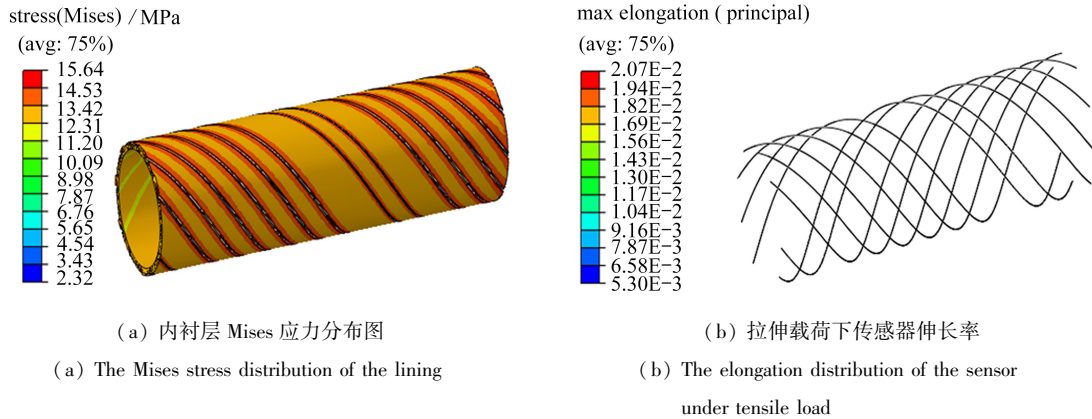


图 7 拉伸载荷下的仿真结果

Fig. 7 The simulation results under tensile load

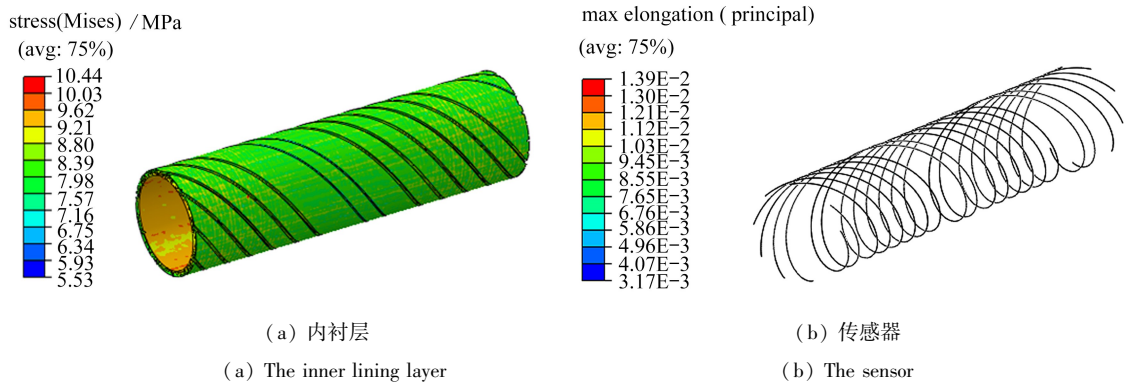


图 8 内压 20 MPa 下的 Mises 应力分布

Fig. 8 The Mises stress distribution under an internal pressure of 20 MPa

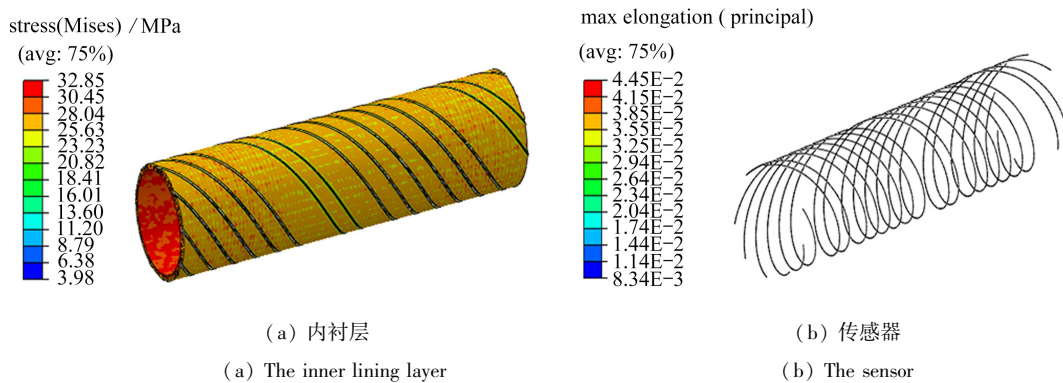


图 9 内压 60 MPa 下的 Mises 应力分布

Fig. 9 The Mises stress distribution under an internal pressure of 60 MPa

4 三种集成加工方案的综合考虑

基于前述有限元仿真计算结果以及对工艺难易程度的分析, 本节对三种光纤传感器集成方案的适用性进行综合评估, 如表 14 所示.

方案 I 在加工过程中对传感器的影响较低, 根据仿真结果, 在典型工艺参数 (张紧力 20~50 N, 缠绕角 35°~54°) 下, 传感器伸长率小于 0.108% 和管体应力小于 1.21 MPa, 远低于材料极限. 由于仅采用数根传感

器绳束等效替代部分芳纶绳,对补偿增强层的承载能力和整体结构连续性影响微乎其微,加工过程安全可靠。该方案加工工艺简便,成本较低,并且与现有柔性管芳纶绳缠绕工艺高度兼容,利用现有的缠绕机即可实现加工。集成后传感器性能良好,可靠性高,传感器位于补偿增强层,紧邻内衬层,能有效感知内衬层应变、压力等参数,灵敏度满足要求。

方案Ⅱ在加工过程中对传感器的影响也较低,根据仿真结果,在张紧力 200~300 N 范围内,传感器伸长率($<1.35\%$)低于极限值,内衬层应力微小(<0.283 MPa),远低于材料极限。集成后传感器性能良好,可靠性高,传感器深埋于预浸带内部(补偿增强层),受到预浸带基体(树脂+纤维)的良好包裹和保护,隔绝外部环境(腐蚀、机械损伤)效果较好,并且传感器内置预浸带中,体积占比小,对预浸带整体力学性能(模量、强度)影响有限,加工过程安全可靠。但是该方案需要开展含传感器的预浸带制备,将传感器平行排列于芳纶纤维层间并浸胶固化,工艺控制要求高,增加了生产复杂度和质量控制难度,成本较高。

方案Ⅲ在开槽过程本身对传感器直接影响较小,但关键风险在于后续服役。内压载荷下(尤其 60 MPa),传感器伸长率(4.45%)远超其极限承载能力(2.8%),虽然外层结构提供支撑,但在高压或冲击载荷下,开槽区域是潜在的失效起始点,因此存在极高失效风险。而且该方案需在内衬层外表面精确铣削螺旋槽道(深度、宽度、螺距一致性要求高),加工步骤耗时且需要高精度数控机床,显著增加制造成本和工时。加工过程需将多条传感器精准嵌入槽道,并完成真空注胶封装(热熔胶),操作繁琐,固化时间增加。

表 14 三种方案的集成加工过程对传感器的综合影响分析

Table 14 Analysis of the comprehensive impact of integrated processing processes of 3 solutions on sensors

methods	advantage and disadvantage of the plan	overall consideration
method I : sensor and aramid ropes winding processing	low stress and high safety; mature manufacturing equipment and simple process flow; the sensor is well protected; but the consistency between the aramid rope and the sensor winding needs to be controlled to some extent	considering the difficulty
method II : the sensor is embedded in a pre-impregnated tape and wrapped for processing	strong structural integrity and excellent corrosion resistance; high precision requirements for winding; however, the preparation of prepreg is complex and costly; high requirements for process control the sensor is close to the inner wall, with high monitoring sensitivity; however, stress concentration is significant under ultimate load; difficult to control processing accuracy; leakage and structural safety hazards exist	of structural design and processing technology, method I is suggested
method III : groove the lining and embed the sensor inside the groove		

5 结 论

本研究通过有限元模拟与工艺分析,系统评估了三种光纤传感器集成工艺在深海非粘结柔性管中的适用性。结果表明:

- 1) 芳纶绳缠绕工艺(方案Ⅰ)在加工过程中传感器及管道的应力均较低(传感器伸长率 $<0.108\%$,内衬层应力 <1.21 MPa),且工艺难度较小,能够满足极端工况下的力学性能要求,是工程应用的优选方案。
- 2) 预浸带内置工艺(方案Ⅱ)虽能有效保护传感器,但含光纤的预浸带制备复杂,工艺成本较高,需进一步优化材料与工艺匹配性。
- 3) 内衬层开槽工艺(方案Ⅲ)在高压载荷下(60 MPa)易导致光纤失效(伸长率 4.45%),且开槽加工难度大,存在安全隐患,不建议用于实际工程。

参考文献(References):

- [1] HEIN J R, KOSCHINSKY A, KUHN T. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**(3): 158-169.
- [2] ZHANG Q, CHEN X, LUAN L, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: state of the art and perspectives[J]. *Earth Energy Science*, 2025, **1**(1): 65-84.
- [3] 张欣宇, 曹华德, 夏建新. 深海采矿输送软管空间构型及力学性能分析[J]. 矿冶工程, 2024, **44**(5): 22-27. (ZHANG Xinyu, CAO Huade, XIA Jianxin. Analysis of spatial configuration and mechanical properties for flexible hose of deep-sea mining system[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024, **44**(5): 22-27. (in Chinese))
- [4] 高祎凡. 弯曲外压组合荷载下复合材料柔性管极限承载力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023. (GAO Yifan. Investigation on ultimate capacity of composite flexible pipes under bending and external pressure combined loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. (in Chinese))
- [5] DU K, XI W, HUANG S, et al. Deep-sea mineral resource mining: a historical review, developmental progress, and insights[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2024, **41**(1): 173-192.
- [6] ZHANG X, ZUO Y, WEI J, et al. A review on underwater collection and transportation equipment of polymetallic nodules in deep-sea mining[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, **12**(5): 788.
- [7] GAO Q, DUAN M, LIU X, et al. Damage assessment for submarine photoelectric composite cable under anchor impact[J]. *Applied Ocean Research*, 2018, **73**: 42-58.
- [8] SHA F, XI M, CHEN X, et al. A recent review on multi-physics coupling between deep-sea mining equipment and marine sediment[J]. *Ocean Engineering*, 2023, **276**: 114229.
- [9] XIAO J, KANG Z, CHEN M, et al. Dynamic response analyses and experimental research into deep-sea mining systems based on flexible risers[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2025, **24**(4): 789-804.
- [10] HU Q, QIN Y, ZHU J, et al. Research on predicting the mechanical characteristics of deep-sea mining transportation pipelines[J]. *Applied Sciences*, 2024, **14**(16): 7349.
- [11] SUN K, CUI W, CHEN C. Review of underwater sensing technologies and applications[J]. *Sensors*, 2021, **21**(23): 7849.
- [12] CAO C, GE Y, REN X, et al. Experimental research on submarine cable monitoring method based on MEMS sensor[J]. *Micro and Nano Engineering*, 2022, **15**: 100130.
- [13] KHULIEF Y A, KHALIFA A, BEN MANSOUR R, et al. Acoustic detection of leaks in water pipelines using measurements inside pipe[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2012, **3**(2): 47-54.
- [14] TAN T, XU X, LI Y, et al. Research on embedded marine optoelectronic composite shaped cable[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, **24**(17): 27507-27515.
- [15] TANIMOLA F, HILL D. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2009, **1**(4/5): 134-143.
- [16] TAN X, POORGHASEM S, HUANG Y, et al. Monitoring of pipelines subjected to interactive bending and dent using distributed fiber optic sensors[J]. *Automation in Construction*, 2024, **160**: 105306. Doi: 10.1016/j.autcon.2024.105306.
- [17] REN L, JIA Z G, LI H N, et al. Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, **20**(1): 15-23.
- [18] CHATZIGEORGIOU D, YOUCEF-TOUMI K, BEN-MANSOUR R. Design of a novel in-pipe reliable leak detector[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, **20**(2): 824-833.
- [19] LI Y, WU S, LIU C, et al. Modelling and control of tension in a flexible pipe tensile armour manufacturing process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, **133**(7): 3927-3936.
- [20] 秦飞, 沈莹, 陈思. 硅通孔转接板封装结构多尺度问题的有限元模型[J]. 工程力学, 2015, **32**(10): 191-197.

- (QIN Fei, SHEN Ying, CHEN Si. The finite element model of multi-scale structures in TSV interposer packages[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, **32**(10): 191-197. (in Chinese))
- [21] 刘荣梅, 梁大开, 王妮, 等. 光纤力学性能的试验研究[J]. 实验力学, 2007, **22**(1): 79-84. (LIU Rongmei, LIANG Dakai, WANG Ni, et al. Mechanical properties study for optical fibers[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, **22**(1): 79-84. (in Chinese))
- [22] 全国通信标准化技术委员会光缆总规范 第 21 部分: 光缆基本试验方法 机械性能试验方法: GB/T 7424.21—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. (Optical fibre cable generic specification, part 21: basic optical cable test procedures, mechanical test methods: GB/T 7424.21—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese))
- [23] 刘杰, 康红波, 于龙, 等. 国产芳纶纤维力学性能实验探讨[J]. 天津纺织科技, 2014(4): 14-18. (LIU Jie, KANG Hongbo, YU Long, et al. Experimental study on mechanical properties of domestic aramid fiber[J]. *Tianjin Textile Science & Technology*, 2014(4): 14-18. (in Chinese))
- [24] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 267-299. (SHEN Guanlin, HU Gengkai. *Mechanics of Composite Materials*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 267-299. (in Chinese))
- [25] 杜晨, 彭雄奇. 变厚度连续纤维增强复合材料铺层设计优化方法[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(12): 1313-1323. (DU Chen, PENG Xiongqi. Lamination design optimization for continuous fiber reinforced composites of variable thicknesses[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(12): 1313-1323. (in Chinese))
- [26] 孙宇, 李文琦, 周俊杰, 等. 新型光纤传感器在管道渗漏监测中的应用研究[J]. 测控技术, 2023, **42**(1): 35-39. (SUN Yu, LI Wenqi, ZHOU Junjie, et al. Application of new optical fiber sensor in pipeline leakage monitoring[J]. *Measurement & Control Technology*, 2023, **42**(1): 35-39. (in Chinese))
- [27] KANG C, LIU Z, SHIRINZADEH B, et al. Multiparametric sensitivity analysis of multilayered filament-wound cylinder under internal pressure[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, **29**(8): 1172-1183.