研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering
引用格式:魏忠宁,沈义俊,唐耿. 基于有限元方法的柔性立管接头疲劳性能分析 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文),2026,44(1):1−13.
Citation: WEI Zhongning, SHEN Yijun, TANG Geng. Fatigue performance evaluation of flexible riser joints using finite element method[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(1): 1−13.
Open Access

基于有限元方法的柔性立管接头疲劳性能分析

魏忠宁[1,3],沈义俊[2,3]✉,唐　耿[1]
(1. 海南大学 土木建筑工程学院,海南 海口 570228;2. 海南大学 海洋科学与工程学院,海南 海口 570228;
3. 热带海洋工程材料及评价全国重点实验室,海南 海口 570228)

摘　要: 针对深水资源开发中柔性立管接头长期依赖进口、疲劳寿命评估体系不完善的问题,本文以1 200 m水深黏结性柔性立管−浮体平台系统为研究对象,提出了基于多体耦合动力学与疲劳损伤演化机制的接头设计与评估方法。首先通过OrcaFlex建立平台−管道耦合动力学模型,提取管端接口处的有效张力与弯矩时程载荷,然后采用有限元方法建立了复合式与扣压式2种接头结构的参数化模型,并在ANSYS平台上实现了其应力响应与疲劳损伤的精确仿真,最后结合雨流计数法与S-N曲线理论,建立了多轴应力状态的疲劳寿命评估体系。结果表明:复合式接头较扣压式接头,前者最大应力水平降低30%,且应力分布更加均匀,复合式接头具备更优的结构协同性与抗疲劳特性。

关键词: 柔性立管;ANSYS;接头;疲劳寿命;S-N曲线
中图分类号: TE973;O241.82　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)01-0001-13
DOI: 10.65658/j.hndk.2025042801　　CSTR: 32403.14.hndk.2025042801

Fatigue performance evaluation of flexible riser joints using finite element method

WEI Zhongning[1,3], SHEN Yijun[2,3]✉, TANG Geng[1]
(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;
2. School of Marine Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;
3. State Key Laboratory of Tropic Ocean Engineering Materials and Materials Evaluation, Haikou 570228, China)

Abstract: Addressing the challenges of long-term reliance on imported products and the underdeveloped fatigue life evaluation system for flexible riser connectors in deepwater resource development, this study investigates a bonded flexible riser-floating platform system at a water depth of 1 200 m. A design and evaluation methodology for connectors based on multibody coupled dynamics and fatigue damage evolution mechanism is proposed. First, a coupled dynamic model of the platform and pipeline was established using OrcaFlex to extract time-history data for effective tension and bending moment at the pipe-end interface. Then, parametric finite element models of two connector types-hybrid and crimped-were developed, and their stress

Received: 2025−04−28; **Revised:** 2025−08−13; **Accepted:** 2025−08−20; **Available online:** 2025−10−23
✉ **Corresponding author(s):** SHEN Yijun, E-mail: sheny2000@hainanu.edu.cn

responses and fatigue damage were accurately simulated on the ANSYS platform. Finally, a fatigue life evaluation system accounting for multiaxial stress states was established by integrating the rainflow counting method with S-N curve theory. The results demonstrate that, compared to the crimped connector, the hybrid connector exhibits a 30% lower maximum stress level and a more uniform stress distribution, indicating superior structural synergy and fatigue resistance.

Keywords: flexible riser; ANSYS; pipe joint; fatigue life; S-N curve

0 引 言

中国沿海地区拥有丰富的矿产、石油、海洋温差能等资源[1],合理开发海洋资源对改善能源结构、减少对国外矿产进口的依赖具有重要意义。为满足海洋资源开发与权益维护的战略需求,针对深海装备核心技术的研发,将为建立自主可控的海洋工程装备体系提供技术支撑[2]。

海洋立管是浮体平台与海底之间的桥梁,被广泛应用于油气资源开采、温差能发电装置中。从构造方面看,立管可分为柔性立管和刚性立管。柔性立管具有质量轻、抗腐蚀能力强、热绝缘性强和安装简便等优点。刚性立管安装麻烦,在波流作用下容易出现屈曲和疲劳破坏,容易受到海水腐蚀。一些研究发现纤维增强复合材料在水深超过 1 000 m 后展现出很好的应用潜力[3−4],因此复合材料柔性立管将在海洋资源开发中具有广泛的应用前景。立管端部的接头作为关键连接部件,面临复杂海洋环境下的多重载荷耦合作用,承受大交变弯矩和轴向拉力,导致应力集中和疲劳损伤风险显著增加。因此,开展接头可靠性研究至关重要[5−6]。国际主流柔性管接头主要包括 3 类典型结构:Traplock 型接头采用分层沟槽设计,适用于中低压工况但密封性欠佳;Swaged 型接头通过机械压嵌实现连接,易导致纤维损伤,仅限小管径应用;Magma 型接头创新采用碳纤维增强与锥形套筒预紧技术,兼具高承载(>800 kN)和优异密封性能,适用于深海动态环境。Roberts 等[7] 通过小规模的拉伸试验来研究复合材料与接头连接界面的响应,随后采用 ANSYS 软件对接头有限元模型在内部压力、弯曲和轴向载荷条件下进行分析。国内海洋柔性立管接头研究尚处发展阶段。Chen 等[8] 对复合管及其接头进行了一系列力学试验,包括拉伸和拉弯载荷测试,研究其结构性能,此外还对界面破坏、复合材料破坏模式进行了有限元分析。上述研究只是针对复合材料和接头受力分析的研究,但未考虑实际海洋环境因素。

本文在实际海浪条件下,测算浮体平台和柔性立管连接处的受力[9−10],对比复合式接头和扣压式接头 2 种接头在相同工况下的性能。首先,用 ORCAFLEX 软件构建整体模型[11−12],设计了半潜式平台,连接 1 200 m 长的悬链线立管。基于艾里(Airy)和 JONSWAP 波浪理论设置波浪参数[13],模拟 1 000 m 的水深条件进行力学分析,计算得出立管接口处的动力响应。其次,为该模型设计了 2 种不同结构形式的接头,并采用相同材料和导管结构。最后,用 ANSYS 有限元分析软件对接头进行仿真分析,得到接头和复合导管接触面的强度、疲劳寿命等关键参数,评估 2 种接头的性能与特点。

1 柔性管与接口处的受力

1.1 黏结型柔性管结构 采用一种新型复合材料柔性管,其结构由热塑性聚合物与多层纤维增强复合材料带缠绕,并通过黏结工艺结合而成。其特点在于各层间无明显缝隙,有较高的层间剪切强度,这使得管道在承受外力时更为稳定[14]。该设计可有效避免管道端部截面可能出现渗透现象,降低层间腐蚀风险,增强管道的耐压性,适用于各种复杂的工程应用场合。管道结构包括 3 层:内衬层由高密度聚乙烯(HDPE)塑性材料制成,厚度为 12 mm,内径为 300 mm;增强层由 32 层的环氧树脂碳纤维编织浸润料和树脂聚酯复合材料构成,每层厚度 0.5 mm,纤维为±45°交替缠绕[15],属于各向异性构件(环氧树脂碳纤维编织浸润料是增强材料,提供强度和刚度,树脂聚酯起到固定纤维的作用);外保护层由 HDPE 塑性材料构成,厚度为 12 mm,外径为 380 mm。管道结构如图 1 所示,材料参数如表 1 所示。

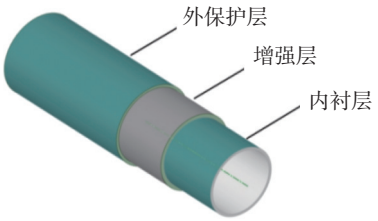


图 1　复合材料管结构

表 1　复合材料管材料参数

材料	模量/MPa	泊松比v	屈服应力/MPa	密度/(kg · m^{-3})
树脂聚酯	3 000	0.32	—	1 200.0
高密度聚乙烯(HDPE)	1 080	0.42	28.4	958.5
环氧树脂碳纤维编织浸润料	E_x=51 690 G_{xy}=3 300	v_{xy}=0.04	x方向829.0	1 450.0
	E_y=51 690 G_{yz}=2 700	v_{yz}=0.30	y方向829.0	
	E_z=7 500 G_{xz}=2 700	v_{xz}=0.30	z方向50.0	

注: 在增强层材料平面内(x-y平面, 即织物平面)沿x方向和y方向的性能近似相等; z方向垂直于x-y平面, z方向的性能取决于环氧树脂和纤维−树脂界面的性能, 该方向性能较低。E_x为面内x方向的弹性模量, E_y为面内y方向的弹性模量, E_z为z方向的弹性模量; G_{xy}为x-y平面的剪切模量, G_{xz}为x方向垂直于z方向的剪切模量, G_{yz}为y方向垂直于z方向的剪切模量; v_{xy}为x-y平面内的泊松比, v_{xz}为面内沿x方向拉伸引起z方向的泊松比, v_{yz}为面内沿y方向拉伸引起z方向的泊松比。

1.2　整体结构与接口处的受力

1.2.1　平台与管道整体结构　用非线性有限元软件 ORCAFLEX 进行整体动态时域分析, 构建半潜式平台, 柔性管道在整体分析中采用缓波型悬链线构型[16], 如图 2 所示。立管悬挂点为固接, 海床锚固点为铰接。浮体平台连接 1 200 m 长的悬链线立管, 模拟下放深度为 1 000 m[17]。

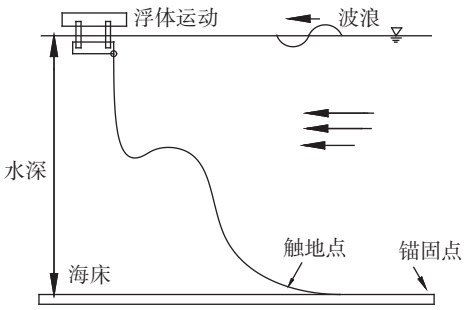


图 2　平台与管道整体结构

1.2.2　柔性立管力学模型　采用空间离散化方法, 基于集中质量理论构建海洋立管动力学数值模型, 质量集中法 Line 模型如图 3 所示。该模型将连续管状结构剖分为 N 段线弹性单元, 通过无质量弹簧连接构造 N+1 个节点体系。节点质量矩阵的构建融合了管体自身质量、浮力调节参数及流体附加质量效应, 依据质量等效原则将单元属性合理分配到相邻自由度。立管微段受力分析如图 4 所示, 微元受力平衡分析揭示了流固耦合作用机理。本文不考虑转动惯量与管道内部流体的影响, 基于空间位形函数 $R(s,t)$ 建立的动力学控制方程为[18]:

$$\frac{\partial \boldsymbol{T}_e}{\partial S_\varepsilon}+\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial S_\varepsilon}+\omega_f+\boldsymbol{\omega}_{eh}+\boldsymbol{\omega}_g+\boldsymbol{B}=m\frac{\partial^2 \boldsymbol{R}}{\partial t^2} \tag{1}$$

其中, S_ε 为立管微元变形后单元弧长, $\boldsymbol{T}_e$ 为微元动态轴向张力矢量, $\boldsymbol{V}$ 为横向剪力矢量, ω_f 为立管与海床接触载荷密度, $\boldsymbol{\omega}_{eh}$ 为立管微元受流体动力载荷分量, $\boldsymbol{\omega}_g$ 和 $\boldsymbol{B}$ 分别为重力场强和浮力集度, $\boldsymbol{R}$ 为立管初始位置矢量, t 为时间变量。根据虚功原理, 将分布载荷(拖曳力和惯性力等)等效凝聚至离散节点, 通过 Hamilton 变分原理推导得到各节点的非线性运动微分方程组, 有效表明了立管系统在复杂海洋环境下的变动力学特性[19]。

根据《西北太平洋波浪统计集》[20] 提供的统计数据, 对中国南部 $S2$ 海域的波浪载荷分布进行分析, 得到波浪散布分块表, 具体内容如表 2 所示。表 2 中参数包括波浪周期 T/s, 以及有效波高 H/m。

根据波浪的散布分块表, 提取出适用于疲劳分析的典型工况。为简化计算从统计数据中筛选出 12 种占比相对较大的典型海况, 并对每种海况占比进行等比例调整, 假设该 12 种海况的占比总和为

M=100%, 调整后各海况新占比为 M_i/M, 以北、东北、东以及东南等方向为例, 调整后的波浪工况占比如表3所示。

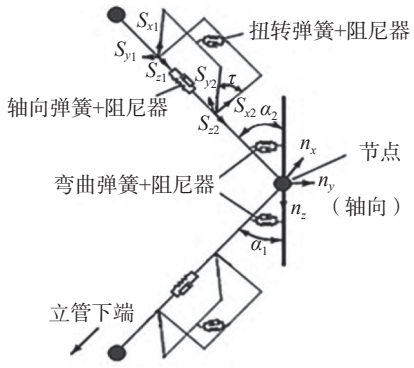


图3 质量集中法 Line 模型

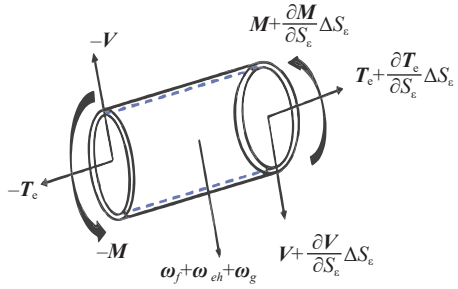


图4 立管微段受力分析

表2 波浪散布分块表

H/m	T/s						
	$T\leqslant 2$	$2<T\leqslant 3$	$3<T\leqslant 4$	$4<T\leqslant 6$	$6<T\leqslant 10$	$10<T$	总计
0	0.139	0.235	0.096	0.002	—	—	0.472
$0<H\leqslant 0.5$	1.798	25.815	16.152	5.922	0.088	—	49.775
$0.5<H\leqslant 1$	1.110	8.768	17.235	7.709	0.364	—	35.186
$1<H\leqslant 1.5$	0.375	1.888	3.238	4.424	0.209	—	10.134
$1.5<H\leqslant 2$	0.052	0.656	0.718	1.588	0.235	—	3.249
$2<H\leqslant 2.5$	0.004	0.117	0.141	0.544	0.096	—	0.902
$2.5<H\leqslant 3$	—	0.004	0.033	0.097	0.087	—	0.221
$3<H\leqslant 3.5$	—	—	0.010	0.015	0.014	—	0.039
$3.5<H\leqslant 4$	—	0.004	—	0.002	0.002	—	0.008
$4<H\leqslant 4.5$	—	—	0.004	0.002	0.004	—	0.010
$4.5<H$	—	—	—	0.004	—	—	0.004
总计	3.478	37.487	37.627	20.309	1.099	0	100.000

表3 波浪工况占比

波浪方向	H/m	T/s	占比/%	工况
北	0.5	2.5	4.493	1
	1.0	3.6	5.599	2
	1.5	5.5	5.354	3
东北	0.5	2.4	7.025	4
	1.0	4.0	14.837	5
	1.5	5.8	9.203	6
东	0.5	2.3	14.603	7
	1.0	3.6	8.617	8
	1.5	5.8	6.148	9
东南	0.5	2.5	10.738	10
	1.0	3.6	7.599	11
	1.5	5.0	5.784	12

统计表明, 该海域的有效波高在 0.5 ~ 1.5 m 之间, 波浪周期在 2.0 ~ 6.0 s 之间, 且波浪方向多集中在250°。其他参数设置, 海水密度 1 025 kg · m^{-3}, 海面流速 1 m · s^{-1}, 海底摩擦因数为 0.5, 海床切向刚度和

法向刚度均为 100 kN・m^{-3}; 海流的流速剖面数据, 如表 4 所示。

表 4　海流流速剖面表

水深/m	流速/(m・s^{-1})	水深/m	流速/(m・s^{-1})
0	1.79	150	0.76
10	1.68	200	0.69
20	1.61	300	0.69
50	1.22	500	0.51
100	0.80	1 000	0.40

1.2.3　静态分析结果　采用分段静力学分析方法, 对缓波型柔性立管沿长度方向的力学响应进行对比研究。立管由悬挂点 *A* 至海床接触点, 依次划分为悬垂段(*A* ~ *C*)、浮力段(*C* ~ *D*)、下降段(*D* ~ *E*)及躺地段(*E* ~ *F*)4 个特征区段。沿立管长度的张力分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 悬挂点 *A* 处因承受平台动态载荷与立管自重, 张力峰值为 46.0 kN, HDPE 增强层在此处呈现最大应力集中; 悬垂段张力由 *A* 至 *C* 点沿管长递减, *C* 点最小值为 22.5 kN; 浮力段因受浮体支撑作用, 张力由 *C* 至 *D* 点沿管长回升至 40.5 kN; 下降段张力由 *D* 至 *E* 点沿管长持续衰减; 躺地段是立管与海底接触区, 张力小于 5.0 kN 且缓慢减小, 最终至 *F* 点完全消失。沿立管长度的曲率分布如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 悬挂点 *A* 因弯曲力矩集中产生 0.012 rad・m^{-1} 的最大曲率, 沿管长至入水点 *B*, 因水面浮力减轻了弯曲效应, 经计算可得曲率骤然下降 82%; 悬垂段(*B* ~ *C*)曲率趋近平稳, 随管道继续延伸到 *C* 点, 曲率迅速减小并接近于零, 表明该段立管趋于笔直; 浮力段因浮体作用使管道再次出现弯曲情况, 从 *C* 点开始曲率突然增大至 0.002 rad・m^{-1}, 此后再次于 *D* 点归零; 下降段(*D* ~ *E*)立管逐渐弯曲, 曲率逐步增大, 直至触地点 *E* 达到较大的曲率值, 在触地段末端(*F*)曲率骤减为零, 因为管道此时完全接触海底, 弯曲消失。

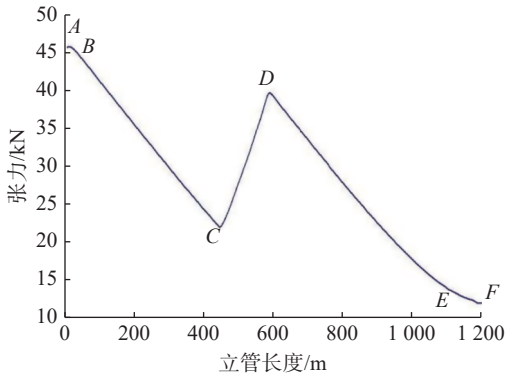


图 5　沿立管长度的张力分布

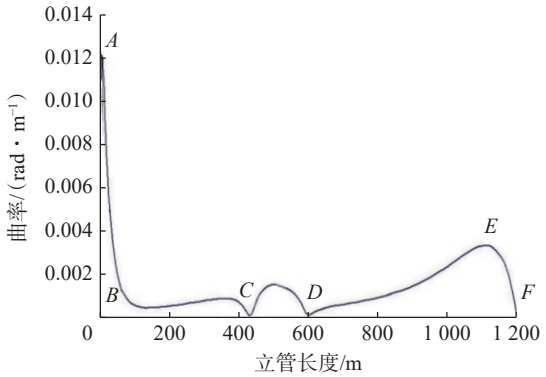


图 6　沿立管长度的曲率分布

研究表明: 张力与曲率沿管长呈负相关分布, 高张力区对应低曲率状态, 低张力区则对应较高曲率状态。在不同受力条件下, 管道的张力和曲率存在相互制约的关系。悬挂点 *A* 作为最大张力 46.0 kN 和最大曲率 0.012 rad・m^{-1} 的复合极值点, 其动态响应特性将作为后续疲劳寿命分析与接头优化设计的关键基准参数。

1.2.4　动态分析−接口处的受力　由表 3 知工况 5 波浪工况占比最多, 将该工况波浪参数输入模型, 进行整体时域分析, 并提取立管悬挂点 *A* 处的张力响应(如图 7 所示)和弯矩响应时程(如图 8 所示)。从图 7 和图 8 中可以看出, 立管悬挂点 *A* 处的有效张力区间为 8 ~ 69 kN, 立管悬挂点处的弯矩值区间为 21 ~ 39 kN・m。

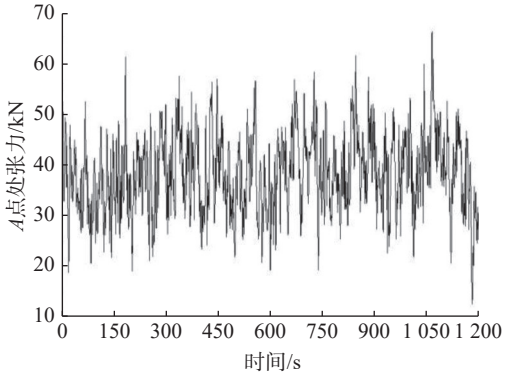


图 7　立管悬挂点处张力响应时程

2 柔性管道接头

2.1 复合式接头 根据海洋管道接头制造技术[21],设计了一种常见复合结构形式的接头,如图9和图10所示。楔块分为4块,楔块之间接触面间隔为0.5 mm。楔块内壁与复合管外保护层外壁接触部分设置了环形锯齿槽,齿高5 mm,数量为6个,总长400 mm。接头内芯与柔性管内衬层表面接触面设置螺纹,螺纹间隔15 mm,接触长度300 mm。锯齿接头构件与立管之间采用了较大的管壁挤压接触摩擦来实现连接。

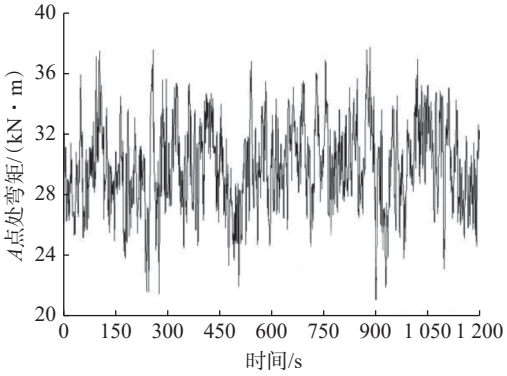


图8 立管悬挂点处弯矩响应时程

参考《起重机设计规范: GB/T 3811—2008》要求,一般情况下,刚柔接触摩擦系数为0.015,柔性接触摩擦系数为0.100,刚性接触摩擦系数为0.150。接头外套与接头主体之间采用了绑定连接,此处为弱应力区域,经模型简化忽略此处的螺纹。接头主体、楔块以及接头外套所选用的材料都是各向同性,选用304SS钢材,该钢材韧性高、优异的耐腐蚀性,能在低温和高温环境下保持良好性能,钢材材料特性如表5所示。304SS钢材的S-N曲线如图11所示,S-N曲线公式: $\lg N = 12.164 - 3.0\lg\Delta\sigma$。使用ANSYS软件,对接头进行有限元仿真分析。

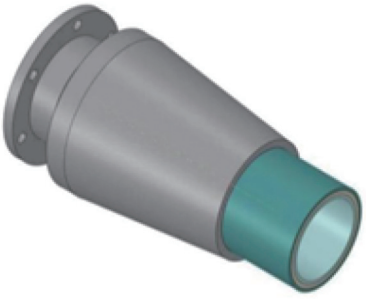


图9 复合式接头外观图

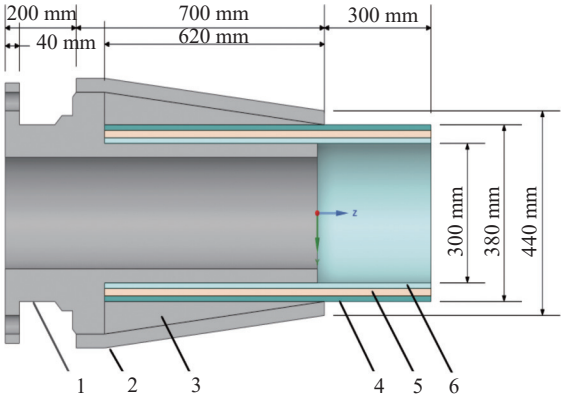


图10 复合式接头结构剖面图[4]

1.接头插管; 2.接头外套; 3.加紧楔块; 4.外保护层; 5.增强层; 6.内衬层

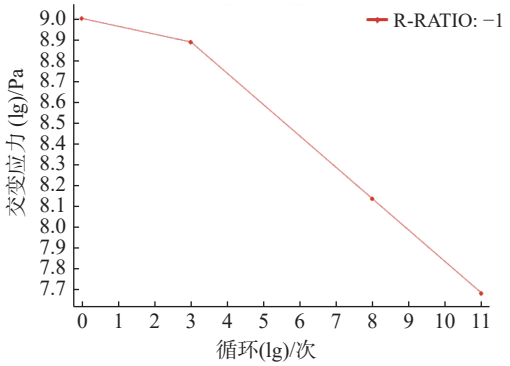


图11 钢材304SS的S-N曲线

表5 接头钢材材料特性

材料	304SS钢材
弹性模量/MPa	186 000
泊松比v	0.3
屈服应力/MPa	235
密度/(kg·m^{-3})	7 850

2.2 扣压式接头 另设计了一种常见的扣压式接头,如图12和图13所示,由接头内芯及接头外套2个部分组成,材料采用304SS钢材(材料数据,同上)。扣压式接头属于机械式接头,具有结构简单、操作方便的优点[22]。

根据柔性管材料与结构参数合理选择扣压量为2 mm[23]。接头外套筒内壁与柔性管外表面接触部分

相应设置螺纹，螺纹间距 15 mm，总长 400 mm。接头内芯与柔性管内表面接触处，设有 15 个环形锯齿槽，齿高 5 mm，该段总长 500 mm。接头外套内壁与导管接触面之间设定接触摩擦系数为 0.015，其他刚性接触摩擦系数均为 0.150。装配过程中，将管端部置于接头内芯和外套中间，通过旋转外套并挤压管道，从而与接头牢固连接。

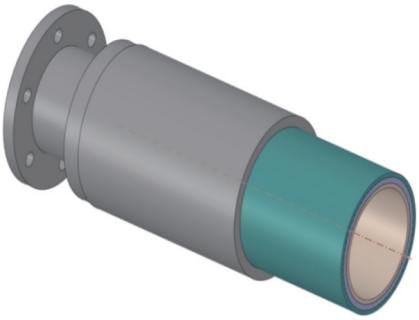


图 12　扣压式接头外观图

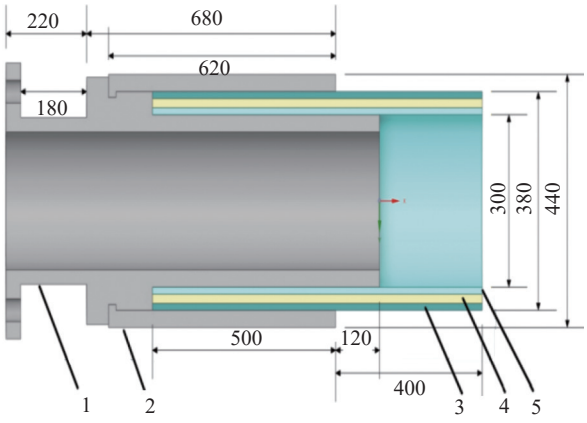


图 13　扣压式接头结构剖面图[23]（单位：mm）

1.接头内芯；2.接头外套；3.外保护层；4.增强层；5.内衬层

3　计算结果和分析

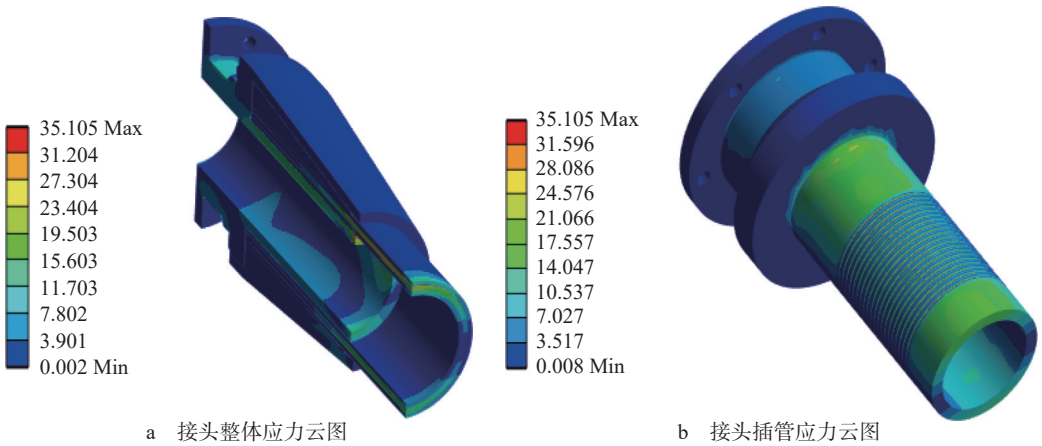
3.1　接头的受力情况　在 ANSYS 有限元分析中，因为实际情况接头位置接近于海面，内部流体压力较小，可以忽略。复合式接头在实际装配过程中，因楔块与外套壁面相互挤压，外套内表面会产生一个方向垂直向外的较小预应力。根据力的相互作用，模拟过程在接头外套外表面施加一个方向垂直向内，大小为 1 MPa 的应力。在扣压式接头模型分析时，无此预紧应力，不做考虑。将 ORCAFLEX 计算得出的外部载荷，如图 7 和图 8 中所示的顶部有效张力和弯矩，施加在接头模型立管的端部。因接头是通过螺栓固定在浮体平台的底部，在有限元分析中，经简化在接头底座设置固定支撑。

3.2　复合式接头的分析结果

3.2.1　复合式接头应力分析　复合式接头应力如图 14 所示。从图 14a 中可以看出，接头在该载荷工况下整体 Von Mises 应力最大为 35.105 MPa，主要分布于接头插管的尖端区域和靠前面的几圈螺纹处。从图 14b 中可以看出，304SS 材料屈服强度 235 MPa，因此在该受力情况下所受应力远小于屈服强度。导管应力如图 15 所示。从图 15 中可以看出，此段导管最大应力 31.168 MPa 在增强层，外保护层和内衬层最大应力只有 13.197 MPa，说明导管部分主要受力是由中间的增强层所承担的，并且小于 HDPE 的允许应力值 28.4MPa，符合要求。因受楔块夹紧的影响和钢材插管对导管的限制，导管前端应力比后段区域的稍大，并且靠前端的 2 圈螺纹和锯齿处有明显的应力增大的趋势，在 6 ~ 8 MPa 之间。这是由于导管受到接头外套限制，前端受到较大弯矩引起的，符合实际情况。综上所述，在此受力条件下，该类型柔性管接头其他各部分结构均不会发生材料屈服，满足设计规范要求。

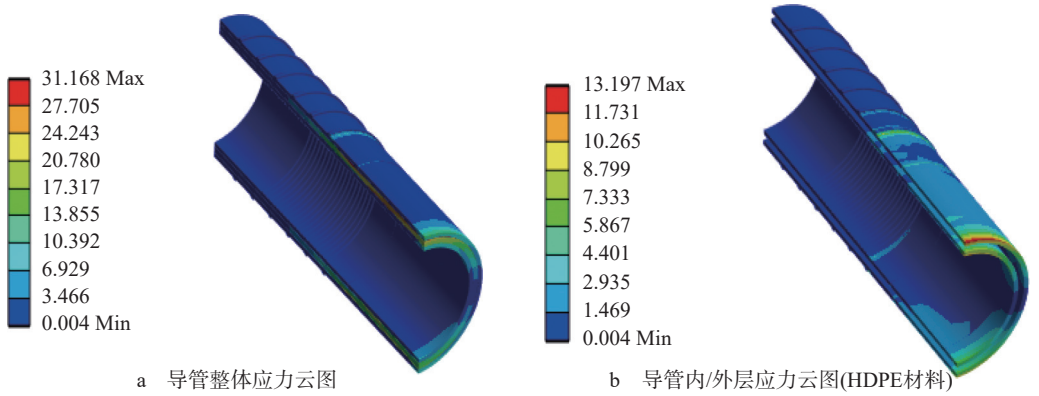
其中，接头插管尖端及螺纹区域的应力集中（35.105 MPa）源于几何突变导致的局部应变能累积，进行结构优化时，可增加过渡圆角，减少应力集中现象。增强层与外保护层应力梯度（31.168 ~ 13.197 MPa），经计算界面剪切应力约为 17.971 MPa，要保证其不超过 HDPE 与纤维增强层界面的黏结强度，否则会导致微裂纹沿 45°最大剪应力方向扩展。

3.2.2　复合式接头疲劳分析　因为海洋环境的复杂放大安全系数，所以取材料有效性的 60% 作为参考。对复合式接头进行疲劳寿命检测，接头插管部分的疲劳寿命如图 16 所示。图 16 中红色区域是构件疲劳寿命的最低点，循环周期为 103.35 亿次，极易发生疲劳破坏。随着颜色由红向蓝变化，疲劳寿命会逐步递增。经观察，最先失效的地方是接头插管的前端第一圈螺纹处。这一位置的疲劳寿命相对较短，在长期使用过程中承受反复的载荷作用，结构强度会逐渐下降，最终导致疲劳破坏。



a 接头整体应力云图 b 接头插管应力云图

图 14 复合式接头应力云图(单位:MPa)



a 导管整体应力云图 b 导管内/外层应力云图(HDPE材料)

图 15 导管应力云图(单位:MPa)

3.3 扣压式接头的分析结果

3.3.1 *扣压式接头应力分析* 扣压式接头应力如图 17 所示。从图 17 中可以看出,接头的 Von Mises 应力最大为 50.494 MPa,主要集中在接头内芯前两圈锯槽处,和接头与底座相连的直角位置。在实际情况下,底座的直角位置是要做圆角处理的,因此实际工程中的应力应略小于此计算结果的。导管应力如图 18 所示。从图 18 中可以看出,导管最大应力是 35.884 MPa,也主要集中在增强层的前半段,后半段因在接头内芯和外套中间受到限制,应力较小,大部分区域不足 15 MPa。导管外保护层和内衬层最大应力只有 13.493 MPa,内衬层前端两圈锯齿处的应力值 (约 9 MPa) 比内衬层最后端两圈锯齿处的应力值 (约 1 MPa) 更大。钢材接头和导管的计算结果,均小于自身材料的允许应力值,符合设计要求。

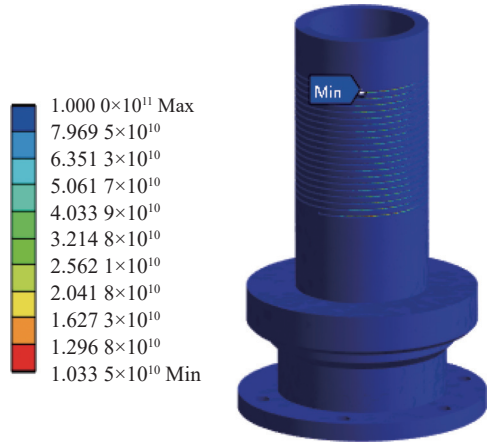
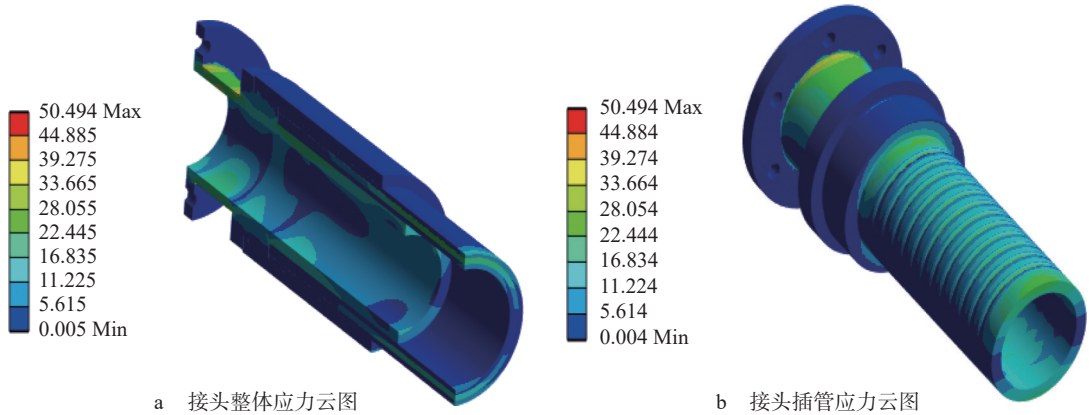


图 16 复合式接头插管疲劳寿命(304SS 钢材)

其中,接头内芯锯槽处应力集中(50.494 MPa)且应力梯度较大,采用双曲率螺纹轮廓可降低 20% 的峰值应力,实现弯矩的均匀扩散。导管的前端锯齿处应力显著高于后端,建议采用渐开线锯齿轮廓优化载荷传递路径,同时应优化底座圆角半径(R≥5 mm)以改善应力分布。

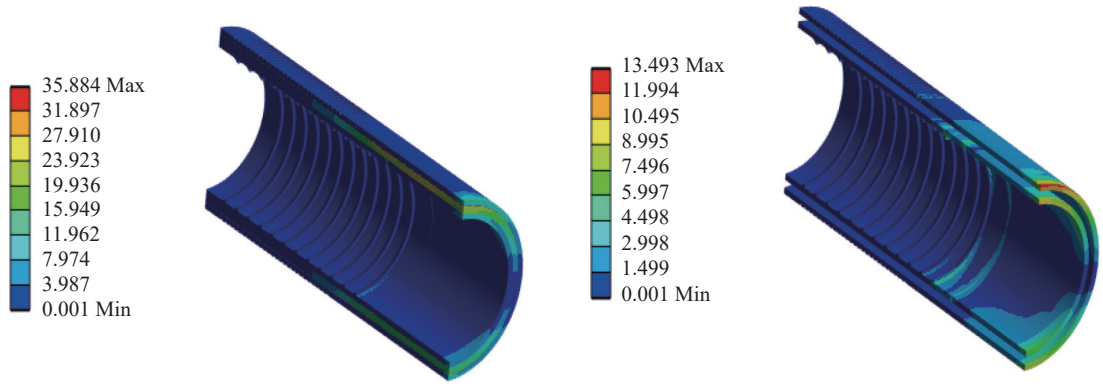
3.3.2 *扣压式接头疲劳分析* 放大安全系数,取材料有效性的 60% 作为参考。对扣压式接头进行疲劳寿命检测,接头内芯部分的疲劳寿命如图 19 所示。图 19 中扣压式接头在内芯前端第一圈锯槽区域内表面

的最小循环周期为 26.027 亿次。因此，在设计和使用接头时，需采取相应措施来提高其疲劳寿命，以确保整个接头的可靠性和安全性，避免因局部疲劳破坏而引发的更大范围的损坏。



a 接头整体应力云图 b 接头插管应力云图

图 17 扣压式接头应力云图（单位：MPa）



a 导管整体应力云图 b 导管内/外层应力云图(HDPE材料)

图 18 导管应力云图（单位：MPa）

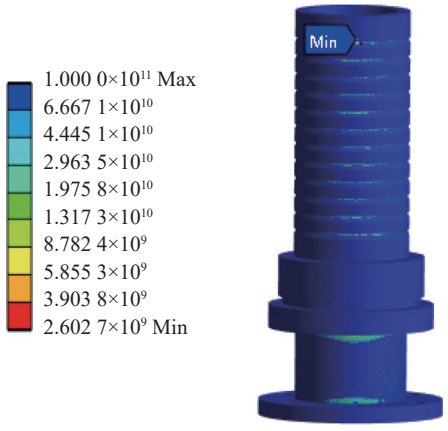


图 19 扣压式接头内芯疲劳寿命（304SS 钢材）

3.3.3 雨流计数 在工程结构疲劳分析领域，雨流计数法是一种基于局部特征识别的经典分析方法[24]，其核心逻辑是通过提取载荷时间序列中的连续 3 个峰谷点，判断中间点幅差是否小于前后 2 个点幅差，若满足则截取中间点构成闭合循环，记录幅值、均值和循环次数后重组数据，循环迭代直至将复杂随机波动分解为可叠加的疲劳损伤等效循环。该方法符合疲劳损伤机理，被 ASTM E1049 标准列为优先采用的循环统计方法。

在基于 ANSYS 平台的构件疲劳寿命分析基础上，为深入研究疲劳失效机理并实现局部应力状态验证，本文通过集成 Ncode DesignLife 模块，系统提取了疲劳热点处的应力时程响应。具体步骤如下：

步骤 1 在 ANSYS 瞬态动力学分析中明确设定疲劳热点位置(记录节点/单元编号),并输出包含完整时间步与应力的结果文件,存储为 Ncode 兼容格式;

步骤 2 在 Ncode 中建立 FE Input,加载有限元结果,通过实体选择工具 Entity Selection 精确定位目标热点;利用 Channel Processing 模块提取热点处多轴应力时程数据,并通过时间序列可视化及 csv 格式导出响应信号。步骤 2 严格校验时间步与单位系统一致性,为后续疲劳寿命校核与局部损伤演化研究提供了高置信度的输入载荷谱;

步骤 3 通过 Matlab 等工具,基于三参数法(幅值−均值−循环次数)对该载荷谱进行处理,为结构提供可靠性评估,具体的雨流计数法的计算流程如图 20 所示。图 20 中 n 为输入应力数据的总数,即数据点的总个数;X_m 为均值,即一个应力循环(波峰与波谷)的平均应力值。

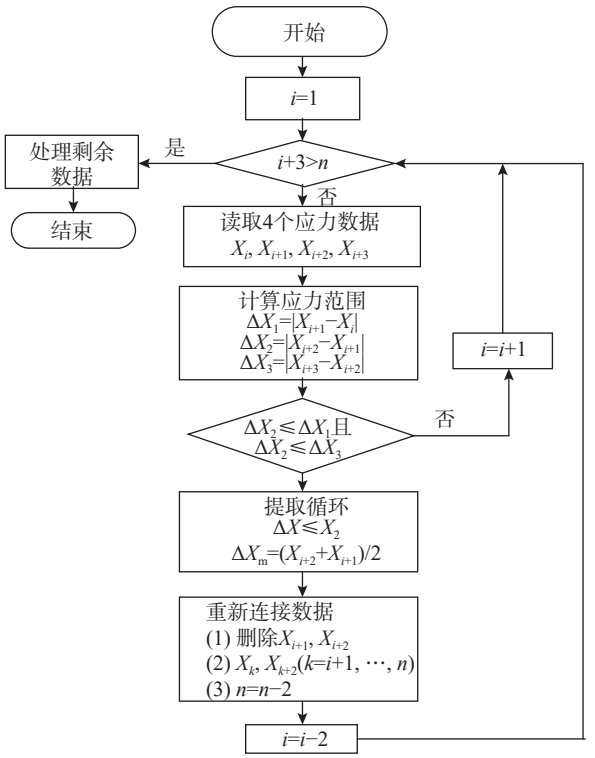
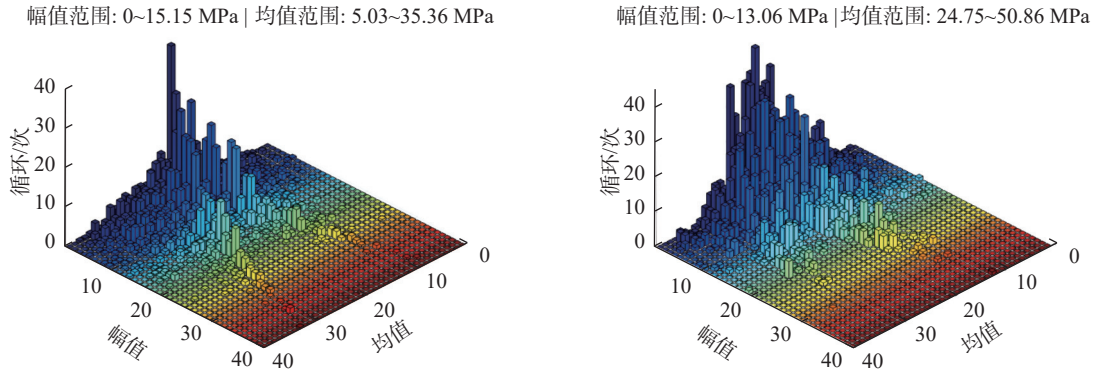


图 20 雨流计数法的计算流程图

对 2 种接头的疲劳性能进行量化评估,雨流计数法周期数的统计结果如图 21 所示。图 21 中复合式接头的应力幅值范围为 0 ~ 15.15 MPa,应力均值范围为 5.03 ~ 35.36 MPa。扣压式接头的应力幅值范围为 0 ~ 13.06 MPa,应力均值范围为 24.75 ~ 50.86 MPa。复合式接头相较于扣压式接头,两者应力幅值范围相近。但前者比后者的应力均值范围,经计算可得降低了 30%。根据 Goodman 平均应力修正理论,降低应力均值可显著提升等效疲劳强度。另外,扣压式接头因较高应力均值可能导致疲劳热点的应力集中现象,加剧了损伤积累,建议在后续设计中优化其应力分布特性。



a 复合式接头周期数统计图　　b 扣压式接头周期数统计图

图 21 雨流计数法周期数的统计图

4 结 论

本文对复合式接头和扣压式接头的静力分析和疲劳寿命分析,得出以下结论:

(1)静力分析中,在相同力作用下复合式接头和扣压式接头所受到的 Von Mises 应力有很大的不同。复合式接头的整体 Von Mises 应力最大为 35.105 MPa,主要分布在接头插管尖端和前几圈螺纹处。扣压式接头的 Von Mises 应力最大为 50.494 MPa,集中于接头内芯前端两圈锯槽和底座连接处。经计算可得,复合式接头的最大应力较扣压式接头的最大应力降低了 30%。

（2）基于实际海洋环境的有效波高和周期，在疲劳寿命模拟中，复合式接头最先失效点位于接头插管前端第一圈螺纹处，最小循环周期为 103.35 亿次。扣压式接头最先失效的点位于接头内芯前端锯槽表面处，最小循环周期为 26.027 亿次。复合式接头的关键失效点比扣压式接头的关键失效点，所能承受的循环次数更多。

（3）采用雨流计数法，通过应力幅值−均值−循环次数的三维载荷谱分析，定量揭示了 2 种接头疲劳热点区域的损伤累积特性。在相同工况条件下，复合式接头的累积损伤程度比扣压式接头的累积损伤程度更低。

综上所述，在实际工程中应优先选用复合式接头。

参考文献：

[1] 岳娟，于汀，李大树，等. 国内外海洋温差能发电技术最新进展及发展建议 [J]. 海洋技术学报，2017，36(4)：82−87.
YUE J，YU T，LI D S，et al. Study on the up-to-date progress and suggestions for ocean thermal energy conversion technologies[J]. Journal of Ocean Technology，2017，36(4)：82−87.

[2] 罗超，亢武臣，薛钊，等. 我国深海油气工程核心技术与装备国产化挑战及对策 [J]. 舰船科学技术，2022，44(23)：74−79.
LUO C，KANG W C，XUE Z，et al. Research on challenges and countermeasures of localization of core technology and equipment of China's deep-sea oil and gas engineering under global market mechanism[J]. Ship Science and Technology，2022，44(23)：74−79.

[3] 彭传远，付新钰，师梦科，等. 大口径热塑性复合材料管及接头内压失效分析 [J]. 工程塑料应用，2022，50(7)：104−109.
PENG C Y，FU X Y，SHI M K，et al. Internal pressure failure analysis of large diameter thermoplastic composite pipe and joint[J]. Engineering Plastics Application，2022，50(7)：104−109.

[4] 张大朋，王少鹏，白勇，等. 基于 ABAQUS 的两种柔性管道接头的分析研究 [J]. 石油工程建设，2019，45(1)：6−12.
ZHANG D P，WANG S P，BAI Y，et al. Analysis and research of two types of flexible pipe connectors based on ABAQUS[J]. Petroleum Engineering Construction，2019，45(1)：6−12.

[5] 王潇，韩伟，李拔，等. 深水油气开采用海洋立管研究进展与展望 [J]. 中国工程科学，2025，27(2)：123−136.
WANG X，HAN W，LI B，et al. Marine risers for deepwater oil and gas exploitation：research progress and prospect[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineerng，2025，27(2)：123−136.

[6] 余建星，范海昭，陈海成，等. 海洋立管失效风险因素分析方法及应用 [J]. 中国安全科学学报，2021，31(11)：47−53.
YU J X，FAN H Z，CHEN H C，et al. Risk factors analysis method of marine riser failure and its application[J]. China Safety Science Journal，2021，31(11)：47−53.

[7] ROBERTS D，HATTON S A. Development and qualification of end fittings for composite riser pipe[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston：OnePetro，2013.

[8] CHEN Y，SEEMANN R，KRAUSE D，et al. Prototyping and testing of composite riser joints for deepwater application[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites，2016，35(2)：95−110.

[9] 程潜. 考虑橡胶-钢界面的 SCR 立管柔性接头弹性体疲劳寿命预测研究 [D]. 北京：中国石油大学(北京)，2021.
CHENG Q. Fatigue life prediction of flexible joint elastomer of SCR riser considering rubber steel interface[D]. Beijing：China University of Petroleum (Beijing)，2021.

[10] 许彦磊. 基于有限元方法的 CFRP 深海立管连接接头拉伸性能分析 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
XU Y L. Analysis of tensile properties of CFRP deep sea riser connection joints based on finite element method[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

[11] 章仲怡. 基于 OrcaFlex 的海洋柔性管水动力分析 [J]. 中国修船，2024，37(1)：54−57.
ZHANG Z Y. Hydrodynamic analysis of marine flexible pipes based on OrcaFlex[J]. China Ship Repair，2024，37(1)：54−57.

[12] 黄心裕，唐军，王晓宇. 基于 Prophet 算法的海南近海波浪长时段时序分析与预测 [J]. 海洋学报，2022，44(4)：114−121.
HUANG X Y，TANG J，WANG X Y. Long term time series analysis and prediction of waves at Hainan offshore zone based

on prophet algorithm[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(4): 114−121.

[13] MIRAB H, FATHI R, JAHANGIRI V, et al. Energy harvesting from sea waves with consideration of airy and JONSWAP theory and optimization of energy harvester parameters[J]. Journal of Marine Science and Application, 2015, 14(4): 440−449.

[14] 首建威, 刘小云, 杨峰雄, 等. 基于 ANSYS Workbench 的水轮机桨叶操作油管疲劳寿命分析 [J]. 微型电脑应用, 2024, 40(11): 39−42.
SHOU J W, LIU X Y, YANG F X, et al. Fatigue life analysis of blade operating oil pipe of hydraulic turbine based on ANSYS workbench[J]. Microcomputer Applications, 2024, 40(11): 39−42.

[15] WANG Y Y, LOU M, DONG W Y, et al. Predicting failure pressure of reinforced thermoplastic pipes based on theoretical analysis and experiment[J]. Composite Structures, 2021, 270: 114039.

[16] 王宝成. 深海复合材料立管渐进损伤分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
WANG B C. Progressive damage analysis of deep-sea composite risers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[17] 宋磊建, 韩芸, 付世晓, 等. 深水缓波形脐带缆结构响应及参数敏感性分析 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(19): 109−114.
SONG L J, HAN Y, FU S X, et al. Structural responses and parameter sensitivity analysis of a lazy-wave deepwater umbilical[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(19): 109−114.

[18] CHAI Y T, VARYANI K S, BARLTROP N D P. Three-dimensional lump-mass formulation of a catenary riser with bending, torsion and irregular seabed interaction effect[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(12): 1503−1525.

[19] WU M, HUANG K. The comparison of various SCR configurations for bow turret moored FPSO in west Africa[C]//The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon: OnePetro, 2007.

[20] 宗芳伊, 吴克俭. 基于近 20 年的 SWAN 模式海浪模拟结果的南海波浪能分布、变化研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2014(3): 1−12.
ZONG F Y, WU K J. Research on distributions and variations of wave energy in South China Sea based on recent 20 years' wave simulation results using swan wave model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014(3): 1−12.

[21] 田阔. 海洋柔性管道接头数字化设计及制造技术 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
TIAN K. Digital design and manufacturing technology of offshore flexible pipe end fitting[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[22] 韩永纲. 高压胶管总成扣压量控制方法探讨 [J]. 装备制造技术, 2015(4): 190−192.
HAN Y G. To investigate the withholds the quantity control method of high pressure hose assembly[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(4): 190−192.

[23] 刘明涛, 杨务滋, 周立强, 等. 高压胶管总成扣压量控制方法研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(2): 135−138.
LIU M T, YANG W Z, ZHOU L Q, et al. Research on control method about the amount of high-pressure hose withhold[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(2): 135−138.

[24] LENG J C, ZHAO L, MAO H B. Online fatigue life prediction method of jacket structures based on proper orthogonal decomposition and rainflow counting algorithm[J]. Structures, 2025, 74: 108517.

作者贡献声明

本声明旨在明确各作者对本论文的具体贡献, 确保学术成果署名的规范性与公平性。各作者贡献如下:

魏忠宁提出核心研究问题, 设计整体实验方案及理论框架; 负责实验和仿真实施、数据采集与系统整理; 主导数据统计分析、结果可视化及结论解读; 撰写论文初稿, 并完成内容的修订与语言润色。唐耿参与数据统计分析及结果可视化工作, 协助解读分析结论; 对论文初稿内容提出关键修改意见, 参与逻辑结构调整及细节完善; 负责研究过程的学术指导与方向把握, 对研究设计及结论推导提出指导性建议。沈义俊提供实验所需核心设备及部分经费支持, 协调关键数据资源; 参与论文最终修订, 给出系统性修改

方案。

利益冲突声明

作者声明,其不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用:本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025042801。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢 (Acknowledgements)

本文得到以下基金项目支持:国家自然科学基金项目(52231012);海南省重大科技计划项目(ZDKJ2021027)。

This article was supported by the following funding projects: National Natural Science Foundation of China (52231012); Hainan Major Science and Technology Program (ZDKJ2021027).

作者简介

魏忠宁(1993—),男,湖南衡阳人,海南大学 2021 级土木建筑工程硕士研究生,E-mail: 21210814000021@hainanu.edu.cn

沈义俊(1964—),男,湖北武汉人,博士,教授,研究方向:深海资源开发技术与装备,E-mail: sheny2000@hainanu.edu.cn

(责任编辑:高　喆,英文校对:张海滨)

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.