

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.020

液化天然气低温螺旋波纹管拉伸力学行为数值模拟

程昊^{1,2}, 李方遒^{1,2}, 李欣欣^{1,2}, 范明龙^{1,2}, 卢海龙³, 殷旭³, 阎军³

(1. 中海石油气电集团技术研发中心, 北京 100028; 2. 中国海洋石油集团有限公司液化天然气及低碳技术重点实验室, 北京 100028; 3. 大连理工大学力学与航空航天学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 考虑低温材料非线性和结构几何非线性因素, 基于参数化模型构建了液化天然气低温螺旋波纹管三维壳体有限元模型, 模拟分析了不同波高、波长和厚度 3 个轴向截面参数对低温螺旋波纹管拉伸性能的影响规律, 探讨了不同参数下低温螺旋波纹管的应力分布、应变特性和拉伸刚度变化规律。模拟结果表明: 轴向截面参数显著影响低温螺旋波纹管的拉伸性能, 波高越大, 轴向应力和应变越高, 而拉伸刚度则越低; 波长越大, 拉伸刚度和应力越大; 厚度越大, 低温螺旋波纹管承受的拉伸荷载和拉伸刚度越大。

关键词: 液化天然气; 低温螺旋波纹管; 拉伸性能; 数值模拟

中图分类号: TU311; TE832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0170-07

Numerical simulation of tensile mechanical behavior of LNG cryogenic helical corrugated tube

CHENG Hao^{1,2}, LI Fangqiu^{1,2}, LI Xinxin^{1,2}, FAN Minglong^{1,2}, LU Hailong³, YIN Xu³, YAN Jun³

(1. CNOOC Gas & Power Group, Research & Development Center, Beijing 100028, China;

2. CNOOC Key Laboratory of Liquefied Natural Gas and Low-Carbon Technology, Beijing 100028, China;

3. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: By taking into account the nonlinear factors of the cryogenic material and the structural geometric nonlinearities, a three-dimensional shell finite element model of the liquefied natural gas (LNG) cryogenic helical corrugated tube was constructed based on the parametric model. The influence of three axial cross-sectional parameters, namely wave height, wavelength, and thickness, on the tensile properties of the cryogenic helical corrugated tube was simulated and analyzed. The variation laws of stress distribution, strain characteristics, and tensile stiffness of the cryogenic helical corrugated tube under different parameters were discussed. The simulation results show that the axial cross-sectional parameters significantly affect the tensile properties of the cryogenic helical corrugated tube. As the wave height increases, both the axial stress and strain values increase, while the tensile stiffness decreases; as the wavelength increases, both the tensile stiffness and stress increase; as the thickness increases, the tensile load and tensile stiffness that the cryogenic helical corrugated tube can withstand both increase.

Key words: LNG; cryogenic helical corrugated tube; tensile property; numerical simulation

天然气作为一种高效、环保的低碳燃料, 近年来在全球能源结构中的比例持续增长^[1], 低温柔性管道作为液化天然气传输系统中关键设备之一, 连接于浮式液化天然气生产船与运输船之间用于装卸液化天然气^[2-4]。由于波浪流等周期性荷载对船体的影响, 要求低温柔性管道具备一定的柔顺性^[5-9]。低温柔性管道的整体力学性能主要由其内部构件——低温螺旋波纹管(以下简称“波纹管”)体现, 近年来, 针对波纹管在拉伸荷载下的结构性能研究逐渐增多, 主要集中在结构的应力、应变分析方面, 不同研究方法和模型被广泛应用于波纹管结构优化和性能提升的研究中^[10]。

基金项目: 辽宁省自然科学基金重点项目(2023-BSBA-052)

作者简介: 程昊(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事液化天然气输送系统研究。E-mail: chenghao2@cnooc.com.cn

通信作者: 阎军(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋柔性结构研究。E-mail: yanjun@dlut.edu.cn

引用本文: 程昊, 李方遒, 李欣欣, 等. 液化天然气低温螺旋波纹管拉伸力学行为数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 170-176.

CHENG Hao, LI Fangqiu, LI Xinxin, et al. Numerical simulation of tensile mechanical behavior of LNG cryogenic helical corrugated tube [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 170-176.

李宝立等^[11]在 Solidworks 平台上建立了跑道形波纹管的三维有限元模型,并通过 ANSYS 进行有限元分析,得到了跑道形波纹管工作状态下的固有频率,并对比分析了不同参数下跑道形波纹管的应力分布,研究了结构参数对应力的影响。黄瀚林等^[12]将 U 形波纹管简化为梁模型,推导了在内压作用下波纹管轴向补偿能力的计算公式,基于有限元法计算了 U 形波纹管的轴向补偿能力,结果表明,在内压作用下 U 形波纹管的轴向补偿能力随压力的增大呈线性提高。Bardi 等^[13]研究了拉伸、弯曲、扭转和内压作用下波纹管结构的力学性能响应,并分析了截面尺寸如厚度、螺距(波长)和高度(幅值)对轴对称波纹管力学性能的影响规律。Yan 等^[14]分析了波纹管扭转屈曲模式下变形的力学机制,探讨了波纹管波高、波距等对结构稳定性的影响规律。由于受到自身和内部液化天然气重力、浮体运动以及环境荷载的作用,在顶端连接处波纹管会承受轴向拉伸荷载^[15-17],同时,液化天然气的低温环境使材料力学性能较常温发生了显著的变化。液化天然气是一种易燃易爆的液体,在传输的过程中风险较大,在低温管道设计中,低温结构抗拉力学性能的精确评估尤为重要,以保证波纹管的正常运行。现阶段,波纹管技术仍面临诸多难题:一方面,在极端工况下,如超低温环境和高负载条件,波纹管的力学性能变化复杂,现有的研究对其在极端低温条件下的性能评估仍不够全面,难以确保其安全运行;另一方面,对于波纹管几何参数对其力学性能的具体影响规律尚未有深入系统的量化分析,导致在设计阶段难以精准优化参数。

为攻克上述技术难题,本文构建了基于参数化模型的液化天然气波纹管三维壳体有限元模型,综合考虑低温材料非线性和结构几何非线性因素,系统研究了轴向截面参数波高、波长和厚度对波纹管拉伸性能的影响规律,并量化了各参数对拉伸强度和刚度的敏感性,可为波纹管的优化设计提供参考。

1 波纹管有限元模型

波纹管截面形状通常包括 U 形、C 形和 Ω 形,范嘉堃等^[18]对这 3 类金属波纹管进行多工况分析与关键性能指标对比分析,指出 U 形波纹管作为液化天然气低温柔性管道的内衬层结构力学性能表现最佳。因此本文选取 U 形波纹管为研究对象,重点探讨其轴向截面参数对拉伸性能的影响。图 1 为波纹管几何模型,主要几何参数包括外半径 R_0 、内半径 R_1 、螺距 P 和螺旋角度 θ 。

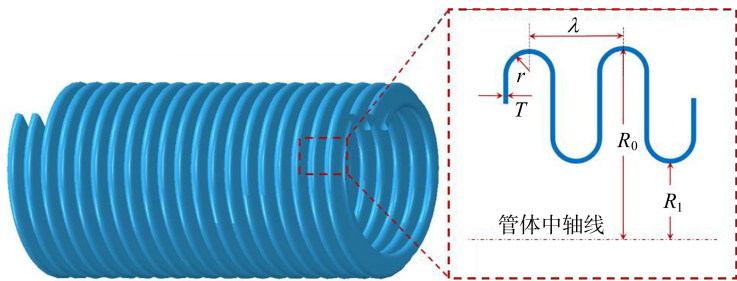


图 1 波纹管几何模型
Fig. 1 Geometric model of corrugated tube

波纹管的轴向截面参数包括波高 H 、波长 λ 和厚度 T 。通过研究上述几何参数和截面参数,发现外半径 R_0 、内半径 R_1 、厚度 T 、波长 λ 为控制参数,波径 r 为跟随参数。控制参数和跟随参数之间的相互关系表达式为

$$H = (R_0 - R_1)/2 \tag{1}$$

$$\tan\theta = \pi(R_0 + R_1)/\lambda \tag{2}$$

$$r = [\lambda \sin\theta + 2(R_1 - R_0) \cos\theta]/4(1 - \cos\theta) \tag{3}$$

参考文献[12]设置波纹管参数,分别为 $R_0 = 149\text{ mm}$ 、 $R_1 = 132\text{ mm}$ 、 $\lambda = 30.2\text{ mm}$ 、 $T = 1.3\text{ mm}$,为了防止端部边界对结构拉伸性能的影响,模型的长度设置为 634 mm 。

1.1 材料本构关系

依据文献[4],在低温环境下(-195.6°C),成型后的 316L 不锈钢波纹材料本构关系可用下式表达:

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon_f + \Delta \\ \sigma_f = \Delta + f[\sigma_0 + K(\varepsilon - \varepsilon_0)^n] \end{cases} \tag{4}$$

式中: σ 、 σ_f 、 σ_0 分别为弹性应力、塑性应力和初始屈服应力; E 为弹性模量; f 为温度对强度影响的无量纲参

数; K 、 n 为材料常数; Δ 为成型工艺和温度的影响程度常数; ε 、 ε_0 分别为应变和初始屈服应变。

假设 316L 不锈钢波纹材料为各向同性金属,具有塑性增强特性,力学性能与时间无关,同时满足有限变形假设。本构关系中的参数取值如下: $E=20.339\text{ GPa}$, $f=1.5$, $K=1\,399.636\text{ MPa}$, $n=1.74$, $\Delta=255.106\,1\text{ MPa}$, $\sigma_0=275.790\,4\text{ MPa}$,泊松比为 0.3,应力-应变本构关系曲线如图 2 所示。

1.2 单元选择与网格划分

在波纹管拉伸有限元模型中,选取正确的单元类型对模拟结果的精确性至关重要,内衬波纹管作为一种典型的薄壳结构,其壁厚与内半径的比值远小于 0.1。波纹管由于其材料特性和低温应用环境,表现出明显的非线性行为。这种非线性不仅体现在材料的应力-应变关系上,还包括在大拉伸荷载作用下可能产生的塑性变形所引发的几何非线性。因此,在有限元模型中,需要选择能够精确解决这些非线性问题的单元类型,本文采用四节点 SHELL43 单元,这种单元不仅具备大应变塑性分析的能力,还能够有效捕捉薄壳结构在大变形条件下的几何非线性行为。SHELL43 单元是一种高阶壳单元,适用于分析薄壁结构的应力状态,尤其是在存在显著非线性效应的情况下,模拟结果也具有较高的精度。

网格的划分质量对有限元模型的模拟精度和效率起着关键的作用。单元的划分应尽量保持均匀一致,避免出现夹角过小的单元而影响计算结果的准确性,此外,还需要通过网格收敛性分析验证有限元模型的可靠性。通过改变网格密度并且比较计算结果的变化,找到最优的网格划分方案。本文通过多次收敛性分析和数值模拟结果对比,最终确定波纹管单元平均尺寸为 1.5 mm,如图 3 所示。最终建立的三维壳体有限元模型如图 4 所示,包含 63 571 个节点和 62 207 个单元。

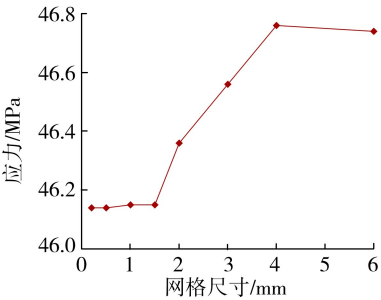


图 3 网格收敛性分析

Fig. 3 Grid convergence analysis

1.3 边界约束与荷载施加

在波纹管拉伸响应分析中,边界条件不仅决定了结构受力和变形的传递方式,还直接影响数值模型的收敛性和稳定性。研究波纹钢管的拉伸性能时,选择适当的边界条件能够确保荷载有效传递,并反映结构在实际应用中的真实行为。为此,波纹管有限元模型的一端完全固定,限制住了所有自由度。模型的另一端放松沿模型轴线的自由度,同时施加轴向拉伸荷载。在模型设置中,波纹管两端的中心区域分别布置了一个 MASS21 质量单元,并通过刚体连接与管端所有节点相连,保证荷载均匀分布。随后在刚性面上施加拉力 F ,以开展数值模拟,深入评估波纹管在拉伸荷载下的力学表现,如图 5 所示。

2 截面尺寸对力学性能的影响

图 6 为拉力作用下波纹管横截面的应力云图,可见波谷应力呈现挤压状态,反之波峰表面应力呈现拉伸

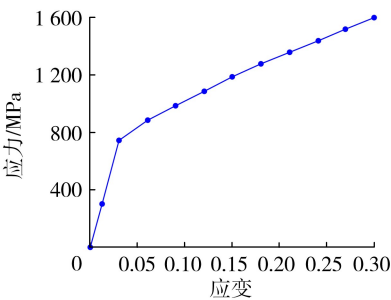


图 2 应力-应变本构关系曲线

Fig. 2 Stress-strain constitutive relationship curve

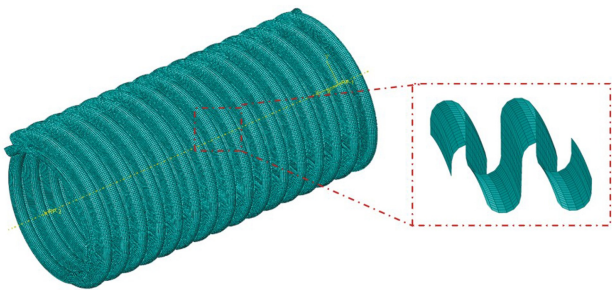


图 4 波纹管有限元模型

Fig. 4 Finite element model of corrugated tube

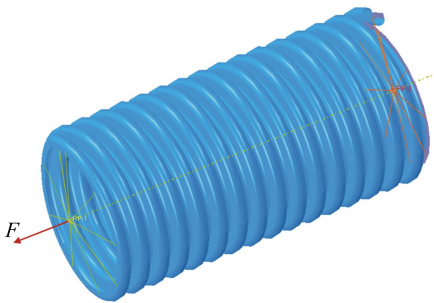


图 5 约束设置和荷载施加

Fig. 5 Constraint setting and applied load

状态,如图 7 所示。为了分析波纹管的拉伸力学响应规律,选取表面波峰和波谷作为分析对象进行探讨。

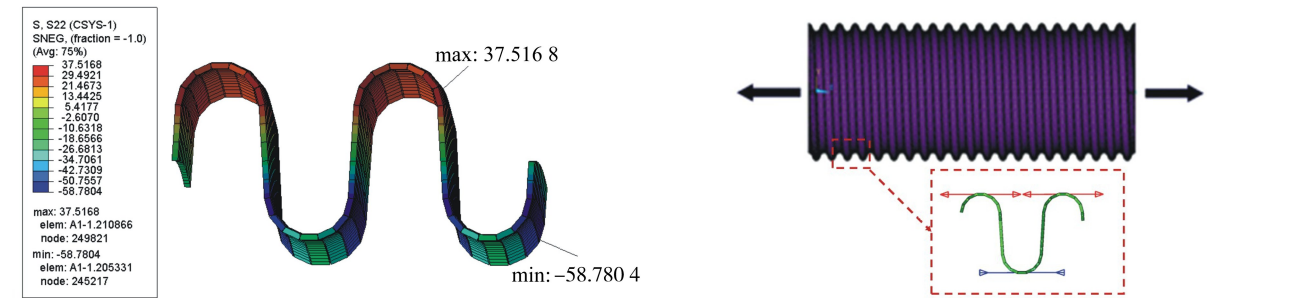


图 6 横截面应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of cross-section

图 7 波峰与波谷应力状态

Fig. 7 Stress state for peak and valley

2.1 波高影响分析

波纹管轴向截面的波高参数表示管体外半径与内半径之间的相对距离。在液化天然气装卸过程中,较小的波高可降低压降损失,提升通流率,从而节省液化天然气装卸时间。此外,波高对波纹管的拉伸性能也有显著影响。为探究波高对波纹管拉伸性能的影响规律,在保持其他参数不变的情况下,分别对波高为 15、17、19、21、25 mm 的波纹管模型进行拉伸力学行为分析。图 8(a)为 5 种波高下,波纹管拉力和位移的关系曲线。由图 8(a)可知,当轴向位移小于 0.05 m 时,拉力随着位移的增加呈现线性变化趋势;随着位移进一步增大,拉力增长逐渐减缓,表明波纹管进入塑性强化阶段。在其他截面参数保持不变的情况下,发现相同轴向位移下,波高越大,波纹管的拉伸刚度越小,如图 8(b)所示。考虑波纹管整体力学性能时,波纹管拉伸刚度随波高增大而降低,因此减小波高有助于提升管体的抗拉性能。图 9 为不同波高下波谷应变、应力与拉力的关系曲线。

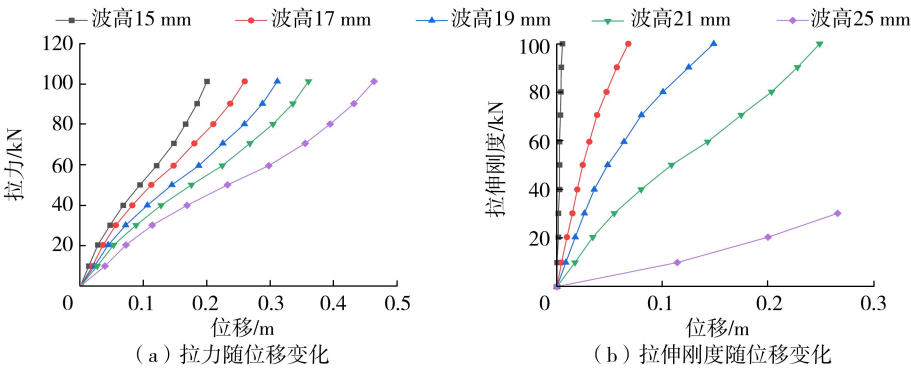


图 8 不同波高下波纹管的力学响应

Fig. 8 Mechanical reponse of corrugated tubes at different wave heights

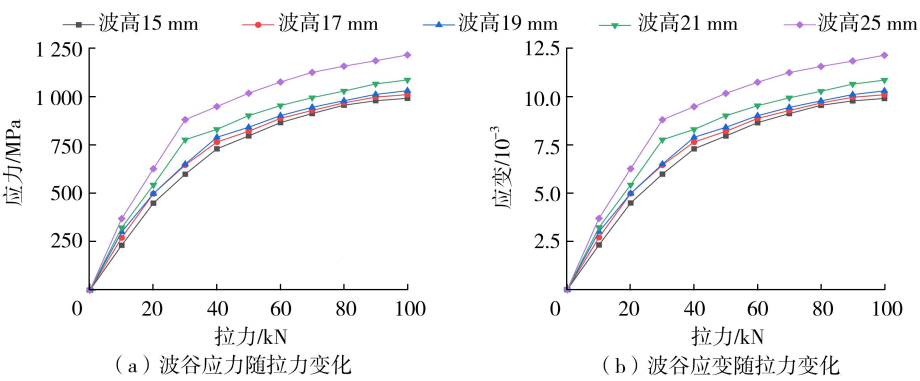


图 9 不同波高下波谷的力学响应

Fig. 9 Mechanical reponse of valley at different wave heights

从图 9 可知,在拉力的作用下,应力随时间的变化与材料的本构关系一致。此外,由于螺旋角度的影响,在屈服应力 530. 89 MPa 之前,波谷应力未完全呈现出线性变化趋势。当拉力小于 30 kN 时,波纹管的应力

随拉力增大而快速增长,此时波高变化对结构应力的影响较小;当拉力超过 30 kN 后,随着拉力的增大,轴向应力增长趋于缓慢,波高对应力的影响显著增强。只改变波纹管轴向截面波高,发现轴向应力随着波高的增大而增大,波高迅速增大会导致应力的明显增大。

上述结果表明,改变波高能够显著影响波纹管的轴向应力、应变和拉伸刚度等力学性能。在相同轴向拉力作用下,波高越大,轴向应力和应变越大,而拉伸刚度则越低。因此,降低轴向截面波高可有效提升管体的抗拉能力,进一步增强波纹管在实际应用中的安全系数。这一发现对于优化波纹管的设计具有重要意义,有助于提高其在液化天然气装卸过程中的效率和可靠性。

2.2 波长影响分析

波纹管的波长是影响其轴向力学性能的主要参数之一,同样对波纹管有限元模型施加线性增加的拉伸荷载,在不改变其他参数的情况下,分析波长(30、40、50 mm)对其拉伸性能的影响规律。

3 种波长下波纹管的轴向拉力和端部位置的位移关系曲线如图 10(a)所示,可以看出不同波长下拉力随位移的变化曲线趋势近乎相同。另外发现,在轴向位移相同的情况下,波长越大(螺距越大)波纹管承受的拉力越大,如 0.15 m 位移时,波长 30、40、50 mm 下波纹管的拉力分别为 59、65、75 kN。图 10(b)为 3 种波长下波纹管在不同拉力下的轴向拉伸刚度,可以发现波长越小其拉伸刚度越小,也就是说其抗拉性能较弱。图 11 为不同波长下波谷应力和应变随拉力的变化趋势。

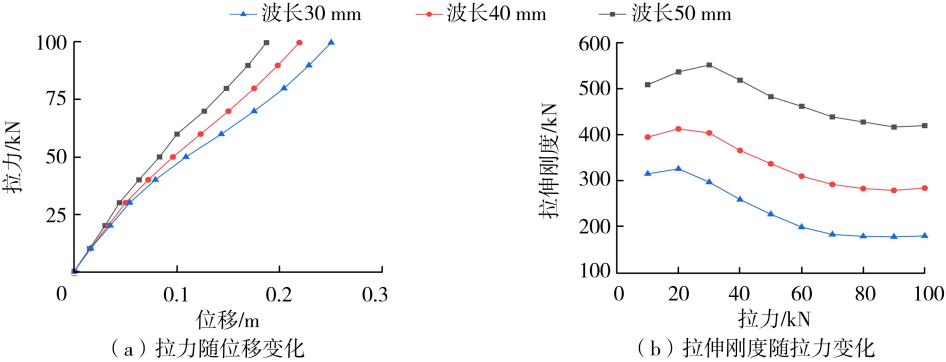


图 10 不同波长下波纹管的力学响应
Fig. 10 Mechanical response of corrugated tubes at different wavelengths

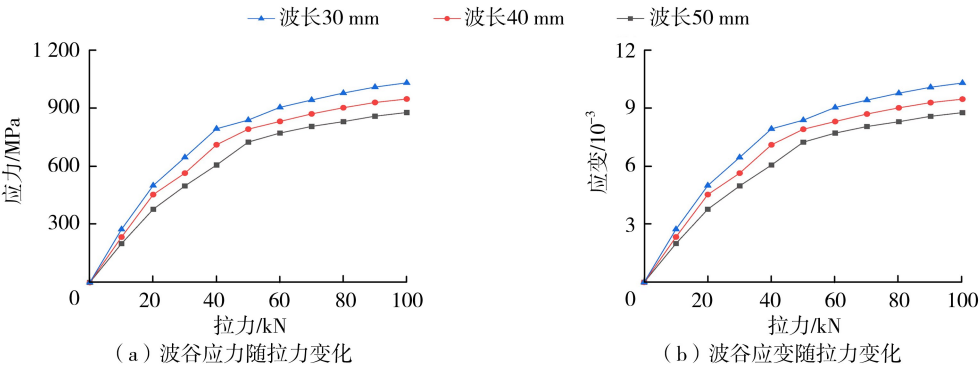


图 11 不同波长下波谷的力学响应
Fig. 11 Mechanical response of valley positions at different wavelengths

由图 11 可知,相同拉力作用下,波长越大波谷应力越小。应力随拉力的变化大致分为两个阶段:当拉力从 0 增大至约 40 kN 时,波纹管的应力随拉力呈线性增长趋势;当拉力进一步增大时,应力增长趋于平缓。出现这一现象的原因与材料的弹塑性有关。由图 2 可以得出波纹管材料的屈服应力为 530.89 MPa,而不同波长下应力曲线的增长趋缓阶段起始于 700~800 MPa,明显高于材料屈服应力,因此应力和拉力的变化关系不仅和材料应力-应变曲线有关,还受到波长结构的影响。

2.3 厚度影响分析

波纹管的厚度也是影响其拉伸刚度和拉伸应力的重要参数,在波纹管的设计和应用中,厚度对其拉伸刚

度、应力等力学行为影响显著。在不改变其他参数的情况下,选择 5 种不同的波纹管厚度(0.5、1.3、1.7、2.1、3.2 mm)来探讨其对波纹管拉伸性能的影响规律。图 12 为 5 种波纹管厚度下波纹管拉力和位移的关系曲线,可见在相同的位移下波纹管承受的拉力随着厚度的增加而增大,而当厚度减小到一定程度时,材料的塑性变形能力明显下降,影响波纹管的整体承载能力。

3 结 论

- a. 波高能够显著影响波纹管的轴向应力、应变和拉伸刚度等力学性能。波高对拉伸刚度和应力具有显著的敏感性,波高增大使得波纹管抗拉能力减弱。
- b. 波长对波纹管结构的整体和局部拉伸力学性能有着显著的影响,波长增大有助于提升波纹管的抗拉性能。
- c. 厚度对波纹管拉伸刚度和应力的影响非常显著,厚度增加能有效增强波纹管的抗拉能力和承载能力。
- d. 波纹管在 700~800 MPa 区间出现应力变缓的特征,这主要源于螺旋结构效应的主导作用,而非由材料屈服应力(530.89 MPa)所控制。

参考文献:

[1] 刘合,梁坤,张国生,等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究[J]. 中国工程科学,2021,23(6):33-42. (LIU He,LIANG Kun,ZHANG Guosheng,et al. China's natural gas development strategy under the constraints of carbon peak and carbon neutrality[J]. Strategic Study of CAE,2021,23(6):33-42. (in Chinese))

[2] DUPONT B,COX P,GARRIGUES J C. Key cryogenic components for dynamic marine LNG transfer at sea: development and tests completed[C]//Offshore Technology Conference 2003. Houston: Society of Petroleum Engineers,2003:1478-1487.

[3] LANQUETIN B,LANTERI-MINET P L,DUPONT B. Innovative architectures for LNG transfer at sea studied[C]//Offshore Technology Conference 2003. Houston: Society of Petroleum Engineer,2003:1496-1510.

[4] 杨亮,刘淼儿,刘云,等. FLNG 低温软管技术现状与应用前景分析[J]. 海洋工程装备与技术,2019,6(6):810-818. (YANG Liang,LIU Miaoer,LIU Yun,et al. Analysis on current situation and application prospect of FLNG cryogenic hose technology[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology,2019,6(6):810-818. (in Chinese))

[5] 谢彬,赵晶瑞,喻西崇. FLNG 外输系统在中国南海的适用性分析及国产化研究思考[J]. 中国海上油气,2020,32(5):152-158. (XIE Bin,ZHAO Jingrui,YU Xichong. Applicability analysis and localization thoughts of FLNG offloading system in the South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas,2020,32(5):152-158. (in Chinese))

[6] FROHNE C,HARTEN F,SCHIPPL K,et al. Innovative pipe system for offshore LNG transfer[C]//Offshore Technology Conference 2008. Houston: Society of Petroleum Engineer,2008:1470-1479.

[7] 张进,安晨,高强,等. 海洋 LNG 低温软管结构设计与试验研究现状[J]. 海洋工程装备与技术,2020,7(5):300-310. (ZHANG Jin,AN Chen,GAO Qiang,et al. Research situation of structural design and experiment of offshore LNG cryogenic hose [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology,2020,7(5):300-310. (in Chinese))

[8] EIDE J,BERNSEN M,HAAKONSEN R,et al. Challenges and solutions in the development of a flexible cryogenic pipe for offshore LNG transfer[C]//Offshore Technology Conference 2011. Houston: Offshore Technology Conference,2011:2569-2580.

[9] QUEAU J P F,TORRE G E. COOL™ hose qualification process of the First EN 1474-2 LNG floating hose[C]//ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: ASME,2011:479-486.

[10] BUITRAGO J,SLOCUM S T,HUDAK S J,etal. Cryogenic structural performance of a corrugated pipe[C]//ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: ASME,2010:331-342.

[11] 李宝立,倪洪启,耿玉博. 基于 ANSYS 的跑道形波纹管结构参数对其应力的影响分析[J]. 管道技术与设备,2024(4):38-42. (LI Baoli,NI Hongqi,GENG Yubo. ANSYS-based analysis of influence of structural parameters of runway-shaped bellows on their stresses[J]. Pipeline Technique and Equipment,2024(4):38-42. (in Chinese))

[12] 黄瀚林,周仕明,李道奎,等. 内压作用下 U 形波纹管轴向补偿能力研究[J]. 强度与环境,2024,51(3):12-17. (HUANG

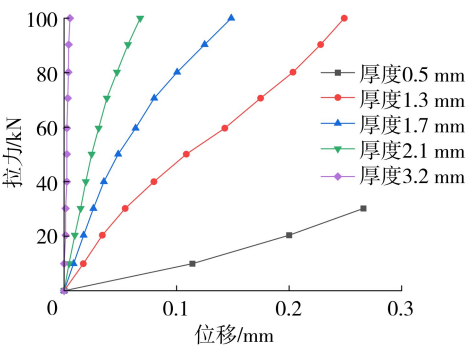


图 12 不同厚度下拉力随位移变化曲线
Fig. 12 Variation of tensile force with displacement under different thicknesses

Hanlin,ZHOU Shiming,LI Daokui,et al. Research on axial compensation ability of U-shaped bellows under internal pressure[J]. Structure & Environment engineering,2024,51(3):12-17. (in Chinese))

[13] BARDI F C, TANG Huang, KULKARNI M, et al. Structural analysis of cryogenic flexible hose [C]//ASME 2011 30th International Conference on Ocean,Offshore and Arctic Engineering. New York:ASME,2011:593-606.

[14] YAN Jun,YING Xipeng,CAO Huixin,et al. Mechanism of mechanical analysis on torsional buckling of U-shaped bellows in FLNG cryogenic hoses[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2022,10(10):1405.

[15] COX P J. Preparing the way for future offshore LNG marine terminals [C]//Offshore Technology Conference 2008. Houston: Society of Petroleum Engineer,2008:618-628.

[16] 万宏强,汪亮. 低温环境下波纹管的轴向刚度计算[J]. 机械强度,2009,31(5):787-790. (WAN Hongqiang,WANG Liang. Finite element calculation to bellows' axial stiffness on cryogenic environment[J]. Journal of Mechanical Strength,2009,31(5): 787-790. (in Chinese))

[17] 杨亮,刘淼儿,范嘉堃,等. LNG 耐超低温柔性管道研究进展综述:工业应用与结构设计分析[J]. 力学学报,2022,54 (10):2904-2921. (YANG Liang,LIU Miaoer,FAN Jiakun,et al. Summary of development of LNG cryogenic flexible hose: industrial application and structural analysis[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2022,54(10):2904-2921. (in Chinese))

[18] 范嘉堃,杨亮,李方遒,等. LNG 低温柔性管道内衬金属波纹管的选型设计[J]. 船舶力学,2023,27(1):121-133. (FAN Jiakun,YANG Liang,LI Fangqiu,et al. Conceptual selection design of metal bellowsin LNG cryogenic hose[J]. Journal of Ship Mechanics,2023,27(1):121-133. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-20 编辑:熊水斌)

+++++
(上接第 72 页)

[35] 王领贺,王松毅,冉艳,等. 生态流量泄放对小水电坝下河段底栖动物群落的影响[J]. 生态学报,2024,44(15):6457-6472. (WANG Linghe,WANG Songyi,RAN Yan,et al. Effects of ecological flow releases on benthic macroinvertebrate community in reaches downstream of small hydropower plants [J]. Acta Ecologica Sinica,2022,44(15):6457-6472. (in Chinese))

[36] 池仕运,王瑞,魏秘,等. 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物群落结构特征和多样性分析[J]. 生态学报,2022,42(21):8723-8738. (CHI Shiyun,WANG Rui,WEI Mi,et al. Community structure and diversity of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River based on the monitoring data from 2010—2019[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(21):8723-8738. (in Chinese))

[37] 曹然,黎征武,毛建忠,等. 北江大型底栖无脊椎动物群落结构及水质的生物评价[J]. 水资源保护,2017,33(4):80-87. (CAO Ran,LI Zhengwu,MAO Jianzhong,et al. Benthic macroinvertebrate community structure and bioassessment of water quality of Beijiang River[J]. Water Resources Protection,2017,33(4):80-87. (in Chinese))

[38] 王燕妮,田伊林,刘雨薇,等. 新疆巩乃斯河枯、丰水期大型底栖动物群落结构与环境因子的关系[J]. 生态科学,2022,41 (5):208-218. (WANG Yanni,TIAN Yilin,LIU Yuwei,et al. The relationship between macrobenthic community structure and environ-mental factors during dry and wet seasons in the Gongnaisi River, Xinjiang[J]. Ecological Science,2022,41(5):208-218. (in Chinese))

[39] 刘鹏,商书芹,谭璐. 济南地区丰水期、枯水期底栖动物群落多样性及其与环境因子的关系[J]. 水产科技情报,2018,45 (5):263-266. (LIU Peng,SHANG Shuqin,TAN Lu. Community diversity of zoobenthos and its relationship with environmental factors in Jinan area during wet season and dry season[J]. Fisheries Science & Technology Information,2018,45(5):263-266. (in Chinese))

[40] 朱晨曦,莫康乐,唐磊,等. 漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应[J]. 生态学报,2020,40(1):60-69. (ZHU Chenxi,MO Kangle,TANG Lei,et al. Spatial-temporal distribution and ecological effects of macroinvertebrate functional feeding groups in the Lijiang River[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(1):60-69. (in Chinese))

[41] RICOTTA C,CARBONI M,ACOSTA A T R. Let the concept of indicator species be functional! [J]. Journal of Vegetation Science,2015,26(5):839-847.

(收稿日期:2024-08-28 编辑:刘晓艳)