

脐带缆铠装层参数对拉伸行为的影响分析

刘文青, 郭海燕*, 陈洪程

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要:脐带缆用于连接水上浮体和水下生产系统, 缆芯由钢管单元、光纤单元和电缆单元等组装而成, 缆体外层是由铠装钢丝层螺旋缠绕以及聚合物外护套组装而成, 截面结构复杂。利用 ANSYS 有限元通用软件建立双层铠装脐带缆的三维多层接触摩擦有限元模型, 计算其截面拉伸刚度, 将拉伸刚度数值模拟值与理论结果进行对比, 验证有限元模型的正确性; 分析比较铠装层不同缠绕角度、缠绕方式和钢丝直径下脐带缆模型的拉伸刚度。结果表明: 铠装钢丝层缠绕方式、缠绕角度、铠装钢丝直径对双层铠装脐带缆模型的拉伸刚度、最大等效应力模拟结果均有影响。

关键词:脐带缆; 铠装层; 拉伸刚度; 等效应力; ANSYS 软件

中图分类号: P754

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2020)02-0086-08

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2020.02.002

引用格式: LIU W Q, GUO H Y, CHEN H C. Analysis on the influence of armor layer parameters of umbilical cable on tensile behavior[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 86-93. 刘文青, 郭海燕, 陈洪程. 脐带缆铠装层参数对拉伸行为的影响分析[J]. 海岸工程, 2020, 39(2): 86-93.

脐带缆是连接顶部浮体与水下生产系统或水下生产系统之间的管缆, 对海洋油气开发至关重要, 为海洋油气开发提供电力、液压通道、所需化学药剂, 且传输信号。拉伸刚度是评价钢管脐带缆性能的重要指标之一, 国内外众多科研人员针对螺旋缠绕结构的拉伸行为开展了大量研究, 较早的研究中理论模型简化为曲梁模型, 之后又发展出弹簧模型、钢丝绳模型以及螺旋圆柱体模型。Costello 和 Philips^[1] 基于曲梁理论对螺旋弹簧结构的基本力学行为分析进行了详细的论述; Knapp^[2-3] 考虑核心圆柱的泊松效应, 针对拉伸过程中的拉扭耦合问题, 采用能量变分法推导出刚度矩阵形式的拉扭模型, 给出了拉扭刚度理论计算公式。但其理论分析中不考虑脐带缆的接触摩擦, 近年来采用有限元分析脐带缆的拉伸刚度成为研究热点, 肖能等^[4] 基于 ANSYS 中的梁单元与线线接触建立脐带缆有限元模型, 对脐带缆的拉伸行为进行了有限元分析; TANG 等^[5] 考虑由于中心圆柱体的径向收缩对脐带缆整体拉伸刚度的影响, 建立半解析半模拟的拉伸刚度模型进行验证; 张梁等^[6] 推导脐带缆单根铠装钢丝拉伸应力与刚度的理论公式, 并用 ANSYS 计算不同螺旋升角、钢丝直径、节圆直径对单根铠装钢丝的力学性能的影响; 张克超等^[7] 利用 ANSYS 软件对无铠装和有铠装脐带缆进行数值模拟分析, 探讨了不同的功能管件缠绕角度、摩擦因数对脐带缆的拉伸刚度的影响, 但未考虑铠装层参数对拉伸行为的影响; 近期, 李晓月等^[8] 基于 ANSYS 软件建立三维无填充和有填充脐带缆模型, 探索了填充对脐带缆拉伸行为的影响。

现有的有限元分析大多数只考虑构件层间接触摩擦, 少有考虑环向接触摩擦, 另外也少有考虑铠装层缠绕方式对脐带缆截面拉伸性能的影响。本文结合以往研究, 建立双层铠装脐带缆的三维有限元模型, 考虑铠装层以及功能构件层间和环向接触摩擦, 分析比较铠装钢丝层不同缠绕方式、缠绕角度和不同铠装钢丝直径下脐带缆的拉伸刚度和最大等效应力。

收稿日期: 2019-11-20

资助项目: 山东省重点研发计划项目——海洋脐带缆涡激振动及抑振关键技术研究(2018GHY115045)

作者简介: 刘文青(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋管道局部性能方面研究。E-mail: 17854239798@163.com

* **通讯作者:** 郭海燕(1959-), 女, 博士, 主要从事海洋管道结构动力方面研究。E-mail: hyguo@ouc.edu.cn

(王佳实 编辑)

1 脐带缆有限元分析

1.1 脐带缆结构

双层铠装钢管脐带缆结构组成如图 1 所示,铠装脐带缆由 2 种构件组成:一种是平行轴线直构件,主要包括有中心钢管、中心聚合物、内外护套等;另一种是螺旋缠绕构件,主要有光纤单元、电缆单元、钢管单元、铠装钢丝等。其几何尺寸如表 1 所示,材料属性如表 2 所示。

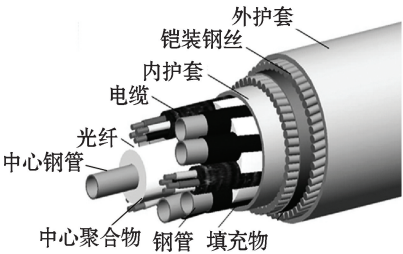


图 1 双层铠装脐带缆结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of double-layer armored umbilical cable

表 1 双层铠装钢管脐带缆尺寸

Table 1 Dimension of the double-layer armored steel pipe umbilical cable

构 件	数 量	单元外径/mm	厚度/mm	截面面积/mm ²	螺旋角度/(°)
中心管件	1	13.6	1	39.6	—
中心聚合物层	1	30.4	8.4	580.6	—
钢管单元	5	15.6	2	39.6	12
电缆单元	3	15.6	—	—	12
光纤单元	1	15.6	—	—	12
电缆单元铜导线	4 股 7 芯	1.04	—	—	—
电缆单元外保护层	1	15.6	5	166.5	—
聚合物内护套	1	71.6	5	1 046.2	—
内部铠装钢丝	47	5	—	—	10
外部铠装钢丝	53	5	—	—	10
聚合物外护套	1	103.6	6	1 839.7	—

注:“—”代表此处无数据

表 2 材料属性

Table 2 Properties of the material

材 料	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
钢材	210	7 800	0.30
铜	109	8 900	0.33
聚合物	1.5	1 000	0.48

1.2 有限元模型

采用大型通用有限元 ANSYS 软件进行建模分析。在对缆芯层进行有限元建模时,忽略层内填充物的影响;对电缆单元不考虑四股铜体导线的相互缠绕,将其简化成中心为铜导体,外包裹聚合物的截面,然后再采用截面刚度等效原则确定等效弹性模量;光纤单元则简化成聚合物保护层包裹钢壳的截面,不考虑钢壳内光纤材料及内部的阻水油脂物质的刚度贡献。而钢管单元外围覆有 1 mm 厚的聚合物保护层,考虑到环向接触,在建模时采用等效刚度原则简化为外径 15.6 mm,壁厚 2 mm 的钢管单元。

1.2.1 单元选择以及接触设置

本文有限元模型取一个节距的长度,轴向划分为 20 个单元。选取能够自定义截面的 beam189 单元来模拟脐带缆的所有构件,对于螺旋结构可采用 ANSYS 命令流循环语句建立螺旋线,再通过 beam189 赋予螺旋线相应的截面即可建立所要求的管件模型。缆芯层内各功能管件的环向接触及层间接触、外层铠装钢丝与外护套以及内层铠装钢丝与内护套的相互作用均采用 conta178 点点接触单元来模拟,而中心钢管与中心聚合物的相互作用则选用 conta176 线线接触单元来处理,并通过设置库伦摩擦来描述接触部位的摩擦行为。双层铠装钢管脐带缆的有限元模型如图 2 所示。

1.2.2 约束设置以及外载荷施加

铠装脐带缆为多层复合结构,为了施加约束的方便,采用 ANSYS 中 cerig 命令对脐带缆端部节点进行耦合处理。拉伸模拟时,对脐带缆端部施加位移载荷,并考虑 2 种不同的拉伸边界条件:1)一端固定,另一端可以发生扭转和轴向位移;2)一端固定,另一端只允许轴向位移,不可扭转。

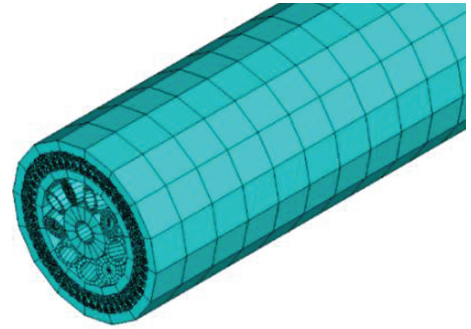


图 2 双层铠装钢管脐带缆有限元模型

Fig.2 Finite element model of double-layer armored steel pipe umbilical cable

2 模型验证

2.1 双层铠装脐带缆拉伸刚度理论分析

脐带缆自由端在受轴向拉伸荷载作用时,由于缆内有缠绕螺旋结构,脐带缆在拉伸过程中会伴随有螺旋构件的扭转,这种现象称为脐带缆的拉扭耦合效应。Knapp 模型针对拉扭耦合问题推导出拉扭模型^[2-3],其拉伸刚度(AE)解析式为

$$AE = k_{11} + k_{12} \Delta\phi / \Delta L, \quad (1)$$

式中: $k_{11} = \sum_{i=1}^n A_i E_i \left(1 - \frac{\Theta}{2} \frac{R_c}{R_i} \tan^2 \alpha_i \right) \cos^3 \alpha_i + A_c E_c$, $k_{12} = \sum_{i=1}^n A_i E_i R_i \sin \alpha_i \cos^2 \alpha_i$; 其中 n 为螺旋管件的个数, E_i , R_i , A_i 和 α_i 分别为第 i 个螺旋管件的弹性模量、节圆半径、截面面积和沿管缆轴向的螺旋角度, R_c 为中心圆柱体的半径, $A_c E_c$ 为平行轴向构件的拉伸刚度; ΔL 为轴向的变形量; $\Delta\phi$ 为扭转角度; Θ 为不可压缩系数,当 $\Theta = 0$ 时,中心圆柱体为刚性;当 $\Theta = 1$ 时,中心圆柱体为不可压缩。若限制自由端约束的扭转位移,即扭转角 $\Delta\phi = 0$,则整体拉伸刚度(AE)为

$$AE = \sum_{i=1}^n A_i E_i \left(1 - \frac{\Theta}{2} \frac{R_c}{R_i} \tan^2 \alpha_i \right) \cos^3 \alpha_i + A_c E_c. \quad (2)$$

2.2 双层铠装脐带缆的模型验证

本文选取功能构件螺旋缠绕角度之间具有代表性的角度进行分析,一端施加位移荷载 $1 \times 10^{-3} L$,即拉伸率为 0.001,理论模型中忽略了各层间摩擦效应,故有限元模型的摩擦系数设为 0,假设中心圆柱体为不可压缩。模拟计算脐带缆在自由端不可发生扭转情况下的拉伸刚度,理论分析与数值模拟的结果以及两者之间的误差见表 3。由表 3 可见:随着螺旋角度的增加,双层铠装脐带缆的拉伸刚度逐渐减小,

表 3 脐带缆自由端不发生扭转时拉伸刚度的计算结果

Table 3 The tensile stiffness calculated in the case of non-twistable free end of umbilical cable

螺旋角度/(°)	理论解 $AE/\times 10^6$ N	数值解 $AE/\times 10^6$ N	误差/%
8	462.89	456.98	1.29
10	461.76	455.86	1.13
12	460.51	454.50	1.32
15	458.38	452.07	1.40
18	455.94	449.19	1.50
20	454.15	447.06	1.59

并且数值模拟与理论值的结果随着螺旋角度的变化趋势相一致,其中最大误差为 1.59%,结果基本吻合,验证了本文采取的建模方法有较高的准确性。

3 结果分析

分析铠装钢丝层缠绕方式、缠绕角度、铠装钢丝直径对双层铠装脐带缆模型的拉伸行为影响。

3.1 双层铠装脐带缆截面等效应力

提取功能构件螺旋角度为 12° 时脐带缆模型端部截面等效应力(图 3),基于冯·米塞斯屈服准则计算所得^[9],相对于其他单元层,铠装层钢丝等效应力明显较大,所以铠装层为最主要的承力层,缆芯层内的钢管承受外荷载所占比例相对较低,但其它单元所做的贡献更低,主要原因在于铠装钢丝的拉伸刚度较大。

3.2 钢丝缠绕方式

考虑功能构件螺旋缠绕方向与内层铠装钢丝缠绕方向的异同,建立同向缠绕和异向缠绕脐带缆模型(图 4),可知,两层铠装钢丝缠绕核心方向相反。

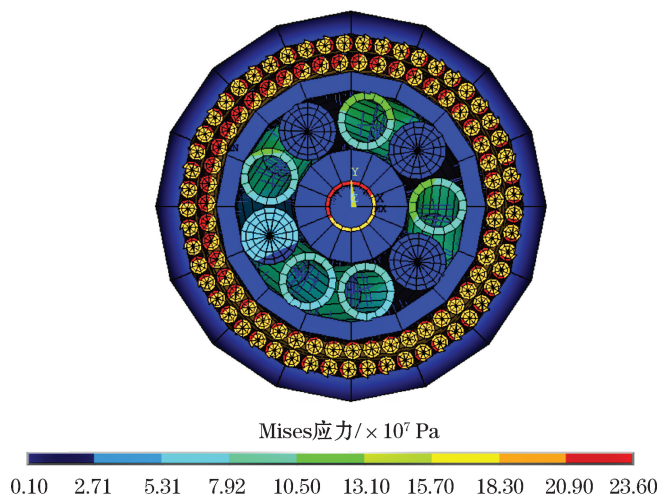


图 3 脐带缆端部截面 Mises 应力

Fig.3 Mises stress at the end section of the umbilical cable

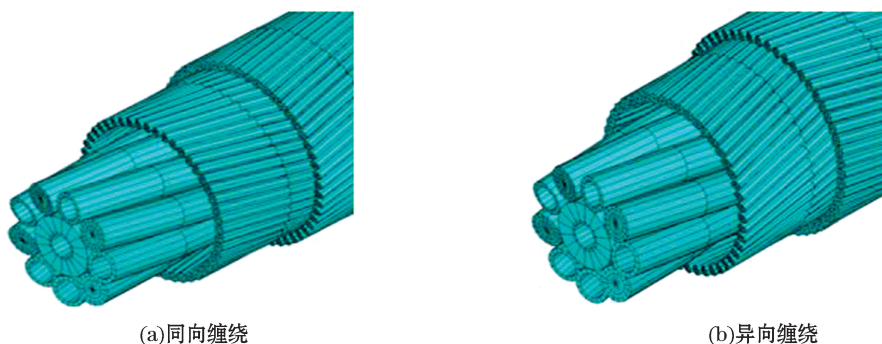


图 4 同向缠绕和异向缠绕脐带缆有限元模型

Fig.4 Finite element model of umbilical cables with same and different winding direction

通过模拟对比分析同向与异向两种缠绕方式在自由端不可扭转和可扭转两种约束条件下的拉伸刚度(图 5)可知,同向和异向缠绕脐带缆模型拉伸刚度均随着功能构件螺旋角度的增大而减小,其中可扭转条件下,两者之间差值也随之增大,这是由于当螺旋角度较大时,扭转耦合对结构的影响也较为突出。图 6 为将自由端可扭转条件下脐带缆 2 种缠绕方式的截面最大等效应力对比的结果,可以看出,异向缠绕脐带缆模型最大等效应力均高于同向缠绕脐带缆模型,这是由于同向缠绕时功能构件与铠装钢丝在允许扭转拉伸时两者存在扭转限制。

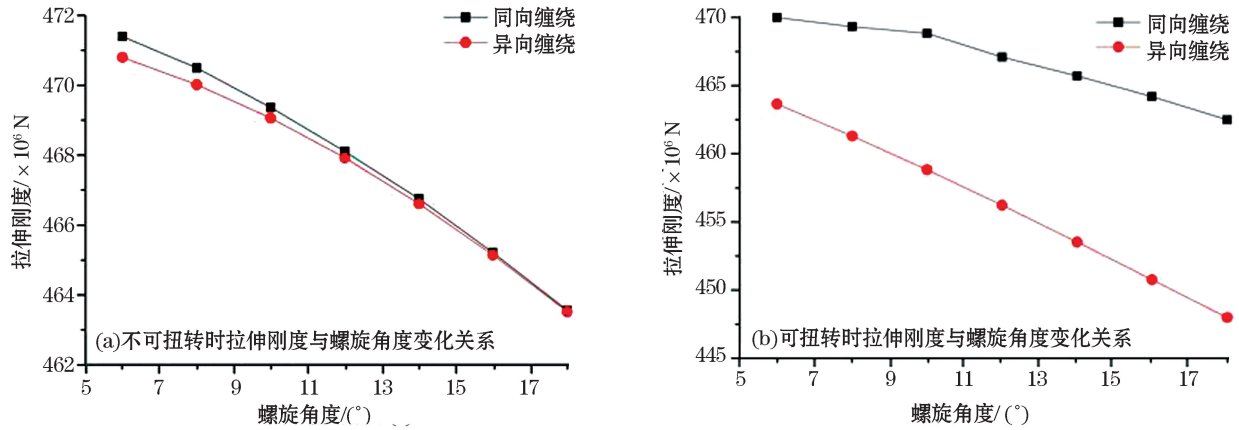


图5 同向与异向缠绕下拉伸刚度对比

Fig.5 Comparison of tensile stiffness with same and different direction winding

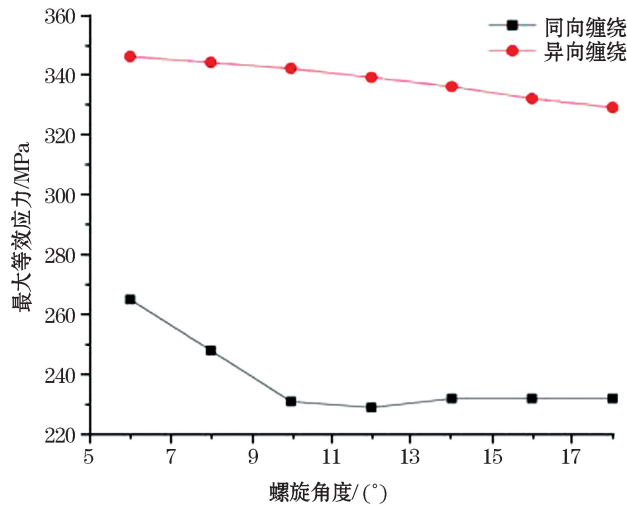


图6 可扭转时同向与异向缠绕下最大等效应力对比

Fig.6 Comparison of maximum equivalent stress with same and different direction winding when twisted

3.3 钢丝缠绕角度

建立钢丝缠绕角度 $6^\circ \sim 18^\circ$ 的双层铠装脐带缆, 为保证铠装钢丝紧密缠绕, 对应的内外层铠装钢丝数量如表 4 所示。在功能构件与内层铠装钢丝缠绕方向相同、摩擦因数为 0.11、其他参数不变情况下, 施加位移荷载 $1 \times 10^{-3} L$, 得到可扭转拉伸条件下的拉伸刚度和最大等效应力与缠绕角度的关系(图 7)。由图 7 可知, 拉伸刚度和最大等效应力都随钢丝缠绕角度的增大而减小, 主要原因在于单根钢丝的拉伸刚度和拉伸应力随着螺旋角的增加而增加。

表 4 铠装层螺旋钢丝不同缠绕角度下的数量

Table 4 Number of armored spiral wires in the case of different wire winding angles

钢丝缠绕角度/(°)	铠装层		钢丝缠绕角度/(°)	铠装层	
	内层	外层		内层	外层
5	48	54	14	46	52
8	47	53	16	46	52
10	47	53	18	45	51
12	47	53			

注: 空白处无数据

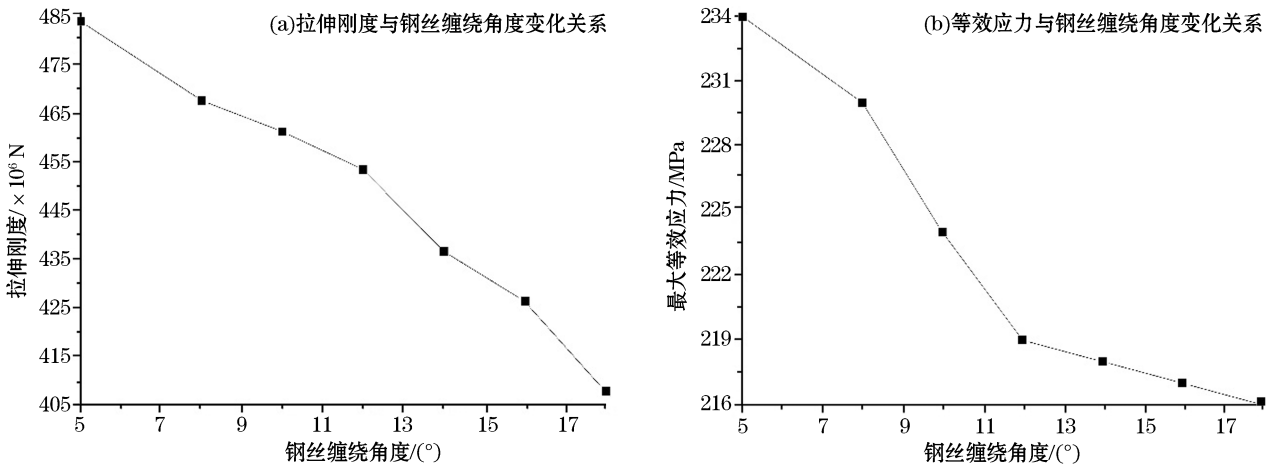


图 7 钢丝缠绕角度对拉伸力学性能的影响

Fig.7 Effect of helix angle on the tensile mechanical properties

3.4 钢丝直径

建立钢丝直径 3~7 mm 的双层铠装脐带缆,为保证铠装钢丝紧密缠绕,对应的内外层铠装钢丝数量如表 5 所示,摩擦因数为 0.11,其他参数不变,施加位移荷载 $1 \times 10^{-3} L$,得到可扭转拉伸条件下的拉伸刚度和最大等效应力与钢丝直径的关系(图 8),由图 8 可知,拉伸刚度和最大等效应力都随铠装钢丝直径的增大而减小,主要原因在于单根钢丝的拉伸刚度随着钢丝直径的增加而大幅度增加,而单根钢丝的拉伸应力却随着拉伸钢丝直径的减小而减小。

表 5 不同直径铠装层螺旋钢丝的数量

Table 5 Number of armored spiral wires in the case of different wire diameters

钢丝直径/mm	铠装层		钢丝直径/mm	铠装层	
	内层	外层		内层	外层
3	77	83	6	40	46
4	58	64	7	34	41
5	47	53			

注:空白处无数据

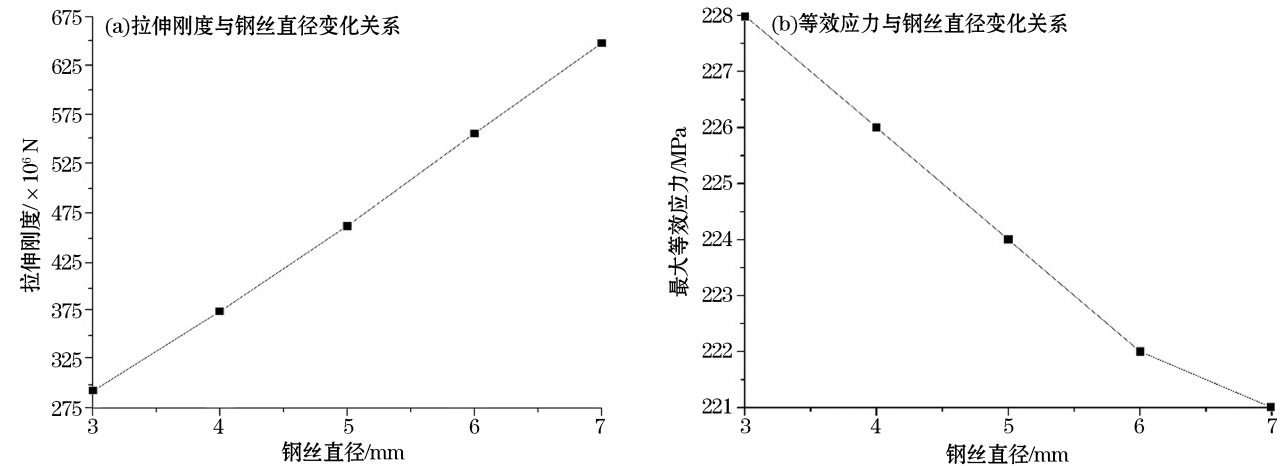


图 8 钢丝缠绕直径对拉伸力学性能的影响

Fig.8 Effect of wire diameter on the tensile mechanical properties

4 结 论

本文利用 ANSYS 有限元软件,建立双层铠装脐带缆模型,对不同铠装钢丝参数的脐带缆模型在自由端不同约束条件下进行分析比较,得到结论如下:

1)脐带缆主要承力构件为铠装层钢丝。

2)同向与异向缠绕方式的脐带缆模型拉伸刚度均随功能构件螺旋角度的增加而逐渐减小。

3)脐带缆铠装钢丝缠绕角度与钢丝直径对脐带缆的拉伸力学性能有一定的影响:铠装钢丝缠绕角度愈大,脐带缆拉伸刚度愈小;铠装钢丝直径愈大,脐带缆拉伸刚度愈大。

参考文献(References):

- [1] COSTELLO G A, PHILIPS J W. Effective modulus of twisted wire cables[J]. ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976, 102: 171-181.
- [2] KNAPP R H. Nonlinear analysis of a helically armored cable with nonuniform mechanical properties in tension and torsion[C]//IEEE. OCEAN 75 Conference. CA: San Diego, 1975: 155-164.
- [3] KNAAP R H. Torque and stress balanced design of helically armoured cables[J]. Journal of Engineering for Industry, 1981, 103: 61-66.
- [4] XIAO N, YAN J, LU Q Z, et al. Finite element analysis for steel tube umbilical cable under axial tension[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(3): 199-202. 肖能, 阎军, 卢青针, 等. 钢管脐带缆拉伸行为的有限元分析[J]. 油气储运, 2012, 31(3): 199-202.
- [5] TANG M G, YAN J, WANG Y, et al. Tensile stiffness analysis on ocean dynamic power umbilical[J]. China Ocean Engineering, 2014, 28(2): 259-270.
- [6] ZHANG L, DING W C, XU X L, et al. Study on mechanical properties of umbilical cable armored steel wire. ship building of china[J], 2015, 56(Suppl.2): 42-51. 张梁, 丁伟宸, 徐青龙, 等. 脐带缆铠装钢丝力学性能研究[J]. 中国造船, 2015, 56(增 2): 42-51.
- [7] ZHANG K C, GUO H Y, ZHAO W, et al. Sectional mechanical properties analysis and numerical simulation of marine umbilical cable [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2019, 46(Suppl.1): 128-134. 张克超, 郭海燕, 赵伟, 等. 海洋脐带缆截面力学性能分析与数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 46(增 1): 128-134.
- [8] LI X Y, GUO H Y, ZHU H Y, et al. Finite element analysis considering the tensile behavior of filled steel tube umbilical cord cable[J]. Periodical of China Ocean University (Natural Science Edition), 2018, 48(Suppl.1): 179-184. 李晓月, 郭海燕, 朱海洋, 等. 考虑填充钢管脐带缆拉伸行为的有限元分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(增 1): 179-184.
- [9] XU B Y. Plastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989: 67-76. 徐兼业. 塑性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 67-76.

Analysis on the Influence of Armor Layer Parameters of Umbilical Cable on Tensile Behavior

LIU Wen-qing, GUO Hai-yan, CHEN Hong-cheng

(*Department of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: Umbilical cable is used for connecting overwater floating body and underwater production equipment. The cable core is usually assembled by pipe unit, fiber unit, and cable unit and the outer layer of the cable is composed of spiral winded armored steel wire and polymer sheath. The cross-section of the umbilical cable is complex. By using ANSYS finite element software, a finite element model of three dimensional multi-layer contact friction is established for the double-layer armored umbilical cable, with which the tensile stiffness of the cross section is calculated. The correctness of the model is then verified by comparing the simulated values of the tensile stiffness with the theoretical ones. The armor layer of the umbilical cable model is analyzed and compared under the cases of different helix angles, different winding modes and different wire diameters. The results show that the helix angle, winding mode and wire diameter of the armor layer can influence on both the tensile stiffness and the maximum equivalent stress of the umbilical cable model.

Key words: umbilical cable; armor layer; tensile stiffness; equivalent stress; ANSYS software

Received: November 20, 2019