

# 深海海底钻机用铠装脐带缆有限元分析

谢焜, 金永平\*, 李兰香, 彭佑多, 张小平

(湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**深海海底钻机用铠装脐带缆是连接深海海底钻机与母船之间的纽带,它不仅可以用来下放和回收深海海底钻机,还可以为深海海底钻机提供电力与信息传输.本文以深海海底钻机用铠装脐带缆为研究对象,首先运用三维软件 Solidworks 构建铠装脐带缆三维几何模型,之后进行铠装脐带缆三维网格模型以及有限元分析模型的构建,其中包括设定铠装脐带缆的材料参数和铠装脐带缆各部件的接触类型为 Bonded 类型,接触行为为 Symmetric,最后利用有限元分析软件 ANSYS 对铠装脐带缆进行有限元仿真分析.结果表明:在 10 t 载荷作用下,铠装脐带缆主要承载部件为外部的铠装层,最大应力为  $1.219 \times 10^{10}$  Pa,最大应变为 0.085 95;外层绝缘层的最大应力为  $4.8 \times 10^8$  Pa,最大应变为 0.481 79.

**关键词:**深海海底钻机;铠装脐带缆;有限元分析

**中图分类号:**TH113.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)03-0034-07

## Finite Element Analysis of Armored Umbilical Cable for Seafloor Drill

Xie Kun, Jin Yongping\*, Li Lanxiang, Peng Youdou, Zhang Xiaoping

(National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The armored umbilical cable is the link between the seafloor drill and the ship. It can not only be used to launch and recovery of the seafloor drill, but also provides power and information transmission for the seafloor drill. Firstly, the three-dimensional software Solidworks is used to build the three-dimensional geometric model of the armored umbilical cable. Secondly, the three-dimensional grid model and the finite element analysis model of the armored umbilical cable are established, and set the relevant parameters and constraints for the finite element analysis model of the armored umbilical cable. Finally, the stress and strain distributions of the armored umbilical cable are analyzed with ANSYS. Results show that when armored umbilical cable under a load of 10 tons, the main bearing part of the armored umbilical cable is the external armored layer, the maximum stress is  $1.219 \times 10^{10}$  Pa, and the maximum strain is 0.085 95. The maximum stress of the outer insulation layer is  $4.8 \times 10^8$  Pa and the maximum strain is 0.481 79.

**Keywords:** seafloor drill; armored umbilical cable; finite element analysis

海洋是人类巨大的共同资源宝库,蕴藏着丰富的金属、油气等多种矿产资源.随着世界经济的快速发展,资源需求与竞争将愈演愈烈,为此,世界各沿海国家和地区纷纷将国家资源战略转向资源丰富的海洋,并从近海向深海扩展<sup>[1,2]</sup>.深海海底钻机是开展海底矿产资源勘探、海底工程地质勘查和深海地质及环境科学研究的关键技术装备<sup>[3-7]</sup>,深海海底钻机用铠装脐带缆则是连接深海海底钻机与母船之间的纽带,它

收稿日期:2020-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705145; 51779092);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50182);湖南省教育厅科学研究项目(18B205);湘潭市科技专项资助项目(CXY-ZD20172001)

\*通信作者, E-mail: jinyongping@hnust.edu.cn

不仅可以用来下放和回收深海海底钻机,还可以为深海海底钻机提供电力与信息传输(如图1所示).由于海洋复杂环境载荷(风、随机不规则波浪、洋流、海面流、海底流以及内波等)的影响,母船将产生复杂的运动响应,此时,铠装脐带缆将会受到较大的时变拉伸荷载的作用.因此,开展在拉伸荷载作用下,铠装脐带缆有限元仿真分析尤为必要<sup>[8-11]</sup>.而构建铠装脐带缆三维几何模型、三维网格模型和有限元分析模型,是开展铠装脐带缆有限元分析的基础.

为此,本文以深海海底钻机用铠装脐带缆为研究对象,首先运用三维软件 Solidworks 构建铠装脐带缆三维几何模型,之后进行铠装脐带缆三维网格模型以及有限元分析模型的构建,并设定铠装脐带缆的材料参数和接触类型,最后利用有限元分析软件 ANSYS 对铠装脐带缆进行有限元仿真分析,为铠装脐带缆的设计、可靠性分析等提供技术支撑.

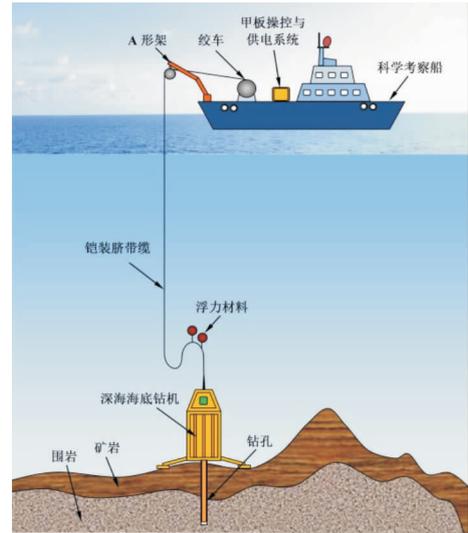


图1 深海海底钻机工作原理图

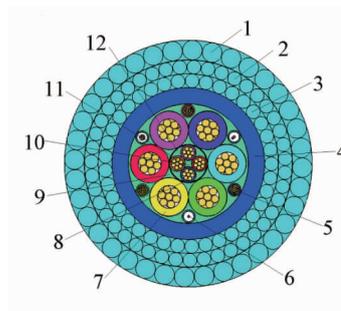
## 1 铠装脐带缆三维几何模型构建

### 1.1 铠装脐带缆三维几何模型

铠装脐带缆主要是由外铠层、中铠层、内铠层、外层绝缘层、接地线单元、光纤单元、主电线单元、内层绝缘层、主电线与内层绝缘层之间的填充物、中心填充物、副电线单元及内层绝缘层填充物组成,如图2所示.铠装脐带缆各构件具体参数如表1所示,内层绝缘层8中设有副电线单元11,副电线单元11是由4根副电线相互螺旋绞合,4根副电线中间空隙设有中心填充物10,中心填充物10采用液体硅橡胶材料制成,中心填充物10位于副电线单元11相互空间螺旋绞合细电线中心处.副电线单元11与内层绝缘层8内壁之间的间隙内设有内层绝缘层填充物12,内层绝缘层填充物12采用液体硅橡胶材料制成.主电线单元7包绕在内层绝缘层8外侧,主电线单元7与内层绝缘层8外壁之间的间隙内设有主电线与内层绝缘层之间的填充物9,主电线单元7与内层绝缘层之间的填充物9采用液体硅橡胶材料制成.所述的外层绝缘层4包在主电线单元7外侧,主电线单元7与外层绝缘层4内壁之间的6个间隙内设有接地线单元5和光纤单元6.所述光纤单元6由3根沿圆周方向均匀布置的光纤组成,每根光纤外表为螺旋状不锈钢管,螺旋状不锈钢管内部填充有变性油膏,3根光纤中第1根光纤内含1根纤芯,第2根光纤内含2根纤芯,第3根光纤内含6根纤芯.外层绝缘层4外侧由内而外依次包有38根内层铠装钢丝(内铠层3)、43根中层铠装钢丝(中铠层2)和36根外层铠装钢丝(外铠层1),铠装脐带缆截面组成如图3所示.



图2 铠装脐带缆三维几何模型



1-外铠层;2-中铠层;3-内铠层;4-外层绝缘层;5-接地线单元;6-光纤单元;7-主电线单元;8-内层绝缘层;9-主电线与内层绝缘层之间的填充物;10-中心填充物;11-副电线单元;12-内层绝缘层填充物

图3 铠装脐带缆截面

表1 铠装脐带缆尺寸

单元类型	外径/mm	内径/mm	数目
外层铠装钢丝	2.60	-	36
中层铠装钢丝	1.80	-	43
内层铠装钢丝	1.80	-	38
外层绝缘层	19.82	15.62	1
接地线	1.70	1.38	3
光纤	1.70	1.38	3
主电线	5.00	3.00	6
内层绝缘层	5.00	4.90	1
副电线	2.00	1.60	4

## 1.2 铠装脐带缆拉伸刚度理论分析理论

由于铠装脐带缆具有非常复杂的结构,材料具有高度非线性,所以在铠装脐带缆拉伸刚度理论分析之前,提出4点假设:(1)铠装脐带缆结构紧密,在未受力时,铠装脐带缆各构件之间无间隙;(2)铠装脐带缆内部部件不相互发生摩擦;(3)铠装脐带缆各部件均匀排列;(4)每一层的伸长量和扭转角均一致<sup>[12-17]</sup>。

当铠装脐带缆受拉伸时,其受力单元主要是其3层铠装层,因此对其铠装层进行理论分析,对单根铠装钢丝缠绕在缆芯上受拉进行分析,如图4所示。

当单根铠装钢丝受拉时,铠装钢丝则会发生应变,将该应变分为轴向应变和径向应变,将分析分成以下2种情况:

1)仅考虑铠装脐带缆轴向应变,设铠装脐带缆轴向变形量为 $\Delta l$ ,铠装钢丝与缆芯轴向夹角为 $\alpha_i$ ,由此铠装钢丝方向变形量则为 $\Delta l \cos \alpha_i$ 。铠装脐带缆变形前的长度 $l_0 = l / \cos \alpha_i$ ,由此铠装钢丝轴向应变与铠装脐带缆轴向应变关系为

$$\varepsilon_{il} = \frac{\Delta l \cos \alpha_i}{l_0} = \frac{\Delta l}{l} \cos^2 \alpha_i. \quad (1)$$

2)仅考虑铠装脐带缆径向应变,设铠装脐带缆径向收缩量为 $-\Delta R$ ,铠装钢丝与缆芯轴向夹角为 $\alpha_i$ ,由此铠装钢丝径向收缩量则为 $-\Delta R \sin \alpha_i$ 。铠装脐带缆变形前的长度 $R_0 = R / \sin \alpha_i$ , $R$ 为铠装钢丝围绕缆芯的半径,由此铠装钢丝轴向应变与铠装脐带缆轴向应变关系为

$$\varepsilon_{il} = \frac{-\Delta R \sin \alpha_i}{R_0} = -\frac{\Delta R}{R} \sin^2 \alpha_i. \quad (2)$$

铠装脐带缆在拉伸时,会发生轴向变形,同时还会发生径向收缩。式(1)和式(2)都是铠装钢丝轴向应变,因此将两式进行合并,得到单根铠装脐带缆的轴向变形与整个铠装脐带缆的变形关系为

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l}{l} \cos^2 \alpha_i - \frac{\Delta R}{R} \sin^2 \alpha_i. \quad (3)$$

铠装脐带缆的拉伸行为则可以表示为

$$F = \sum_{i=1}^m EA \varepsilon_i \cos \alpha_i = \frac{\Delta l}{l} \left( \sum_{i=1}^m EA \cos^3 \alpha_i \right) - \Delta R \left( \sum_{i=1}^m \frac{EA \sin^2 \alpha_i \cos \alpha_i}{R_i} \right). \quad (4)$$

式中: $E$ 为铠装脐带缆的弹性模量; $A$ 为铠装脐带缆的横截面积; $m$ 为铠装层数; $i$ 为层序号。

## 2 铠装脐带缆有限元分析

### 2.1 铠装脐带缆三维网格模型

利用 ANSYS Workbench 软件内子程序 Mesh 进行自动网格的划分,流程为先进进行全局网格参数设置,然后进行局部网格设置,之后预览并划分网格。

全局网格参数的设置,先进进行基本参数设置(Defaults),将 Defaults 区域内 Relevance 参数调为 100,该

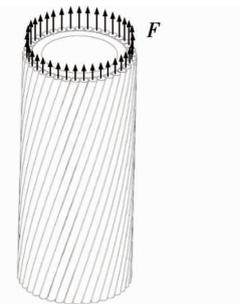


图4 多根铠装钢丝受力

参数用于控制网格划分总体质量,其最大值为 100,值越大,网格质量越细致,其他基本参数采用默认值.进行网格尺寸设置(Sizing),将 Sizing 区域内 Relevance Center 设置为 Fine(细化),该铠装脐带缆三维几何模型长为 0.1 m,考虑最小尺寸,将 Element Size 输入 0.000 5 m 的尺寸,将 Smoothing 设置为 High,其他网格尺寸设置默认,膨胀设置默认.网格高级参数的设置(Advanced),将 Advanced 区域内 Topogy Checking 设置为 yes,全局网格参数设置完成.局部网格设置采取默认设置,铠装脐带缆三维网格模型图如图 5 所示,铠装脐带缆三维网格模型网格质量如图 6 所示,平均质量达到 0.78,可以使用.



图 5 铠装脐带缆三维网格模型

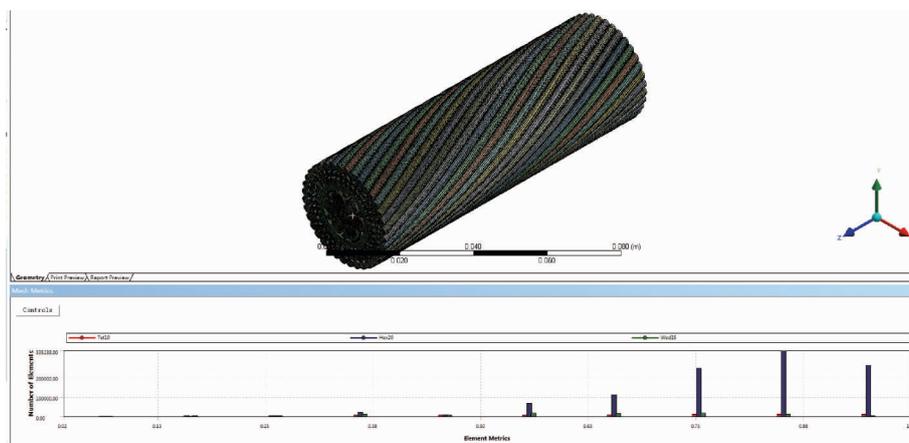


图 6 铠装脐带缆三维网格模型网格质量

## 2.2 材料选择与接触设置

对所有的铠装层、光纤材料定义成结构钢;对外层绝缘层材料定义为热塑性聚氨酯弹性体材料;内层绝缘层材料定义为芳纶纤维;所有填充物材料定义为硅橡胶材料;主电线,副电线,接地线单元中心实心部分定义成铜材料,材料的参数如表 2 所示.采用 ANSYS Workbench 进行接触定义,其铠与铠,铠与绝缘层,绝缘层与光纤单元,光纤单元、主电线、副电线、接地线之间的相互接触的面接触类型都选择 Bonded, Bonded 的接触特点是法向没有间隙,切向不产生滑移,考虑铠缆是由多部件螺旋绞合而成的,其相互接触是没有间隙,且表面摩擦比较大,不产生滑移,因此接触类型选择 Bonded 比较符合实际情况.接触行为选择 Symmetric,对称接触的含义是在界面之间存在两个接触对,即一个面既为接触面又为目标面,使用对称接触在接触计算中有利于提高计算的收敛性,保证了有限元计算的稳定性.该设置与实际情况更加吻合,分析结果稳定.把所有的接触面都定为目标面,如图 7 所示.

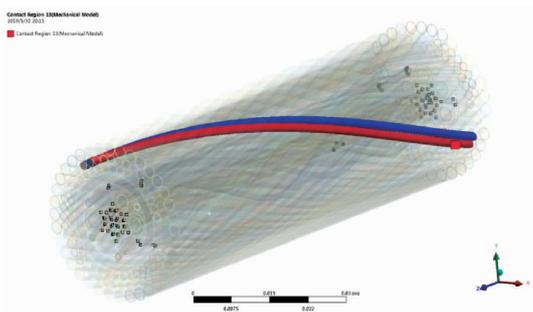


图 7 铠装脐带缆接触类型

表 2 材料的参数

名称	材料	弹性模量/GPa	泊松比
铠装层	结构钢	206.0	0.269
光纤单元			
外层绝缘层	热塑性聚氨酯弹性体	2.0	0.410
内层绝缘层	芳纶纤维	125.0	0.480
填充物	硅橡胶	1.2	0.470
主电线	铜	113.0	0.340
副电线			
接地线			

### 2.3 施加约束与载荷

本文在对铠装脐带缆进行有限元分析之前,先将铠装脐带缆一端面的自由度完全约束,另一端面所有节点自由度进行耦合,并在这个耦合面上施加等效力;通过有限元分析提取相对应的应变,计算铠装脐带缆的拉伸力,分析铠装脐带缆内部受力情况。

### 2.4 分析结果

由于深海海底钻机水中重量为 10 t,因此设置铠装脐带缆受拉力  $F=100\ 000\ \text{N}$ ,利用 ANSYS 软件进行分析,得到铠装脐带缆应变、应力的变化情况.图 8~图 10 分别为外铠、中铠、内铠、外层绝缘层以及铠装脐带缆总体模型的应变、应力云图。

由图 8~图 10 可知,铠装层所受应力最大,且最大应力出现于铠装层的内铠,而铠装脐带缆的外层绝缘层的应变最大.通过铠装脐带缆拉伸刚度理论分析模型,计算得到铠装脐带缆在承受 100 000 N 拉伸载荷作用下,铠装脐带缆的铠装层钢丝为主要承载部件,并且外层铠装层承受载荷最大.在所有铠装层中,内层铠装层铠与铠相接触的地方出现最大应变、应力(如图 8 所示),这是由于内层铠装层铠与铠之间排列紧密,当外层铠装层承受拉伸载荷时,外层铠装层发生细微的径向变形,挤压内层铠装层所致。

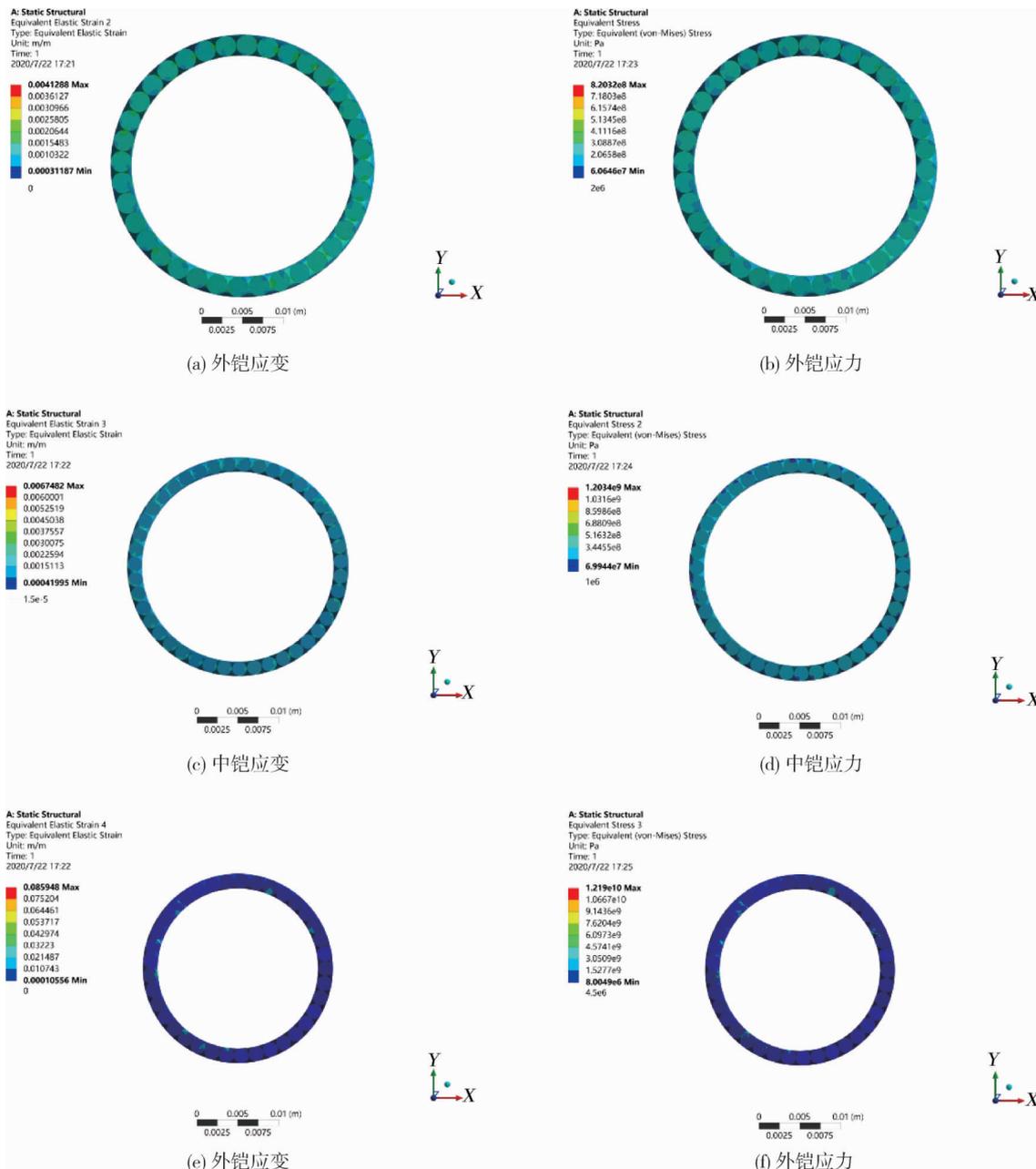


图 8 100 000 N 拉力作用下外、中、内铠分析应变、应力云图

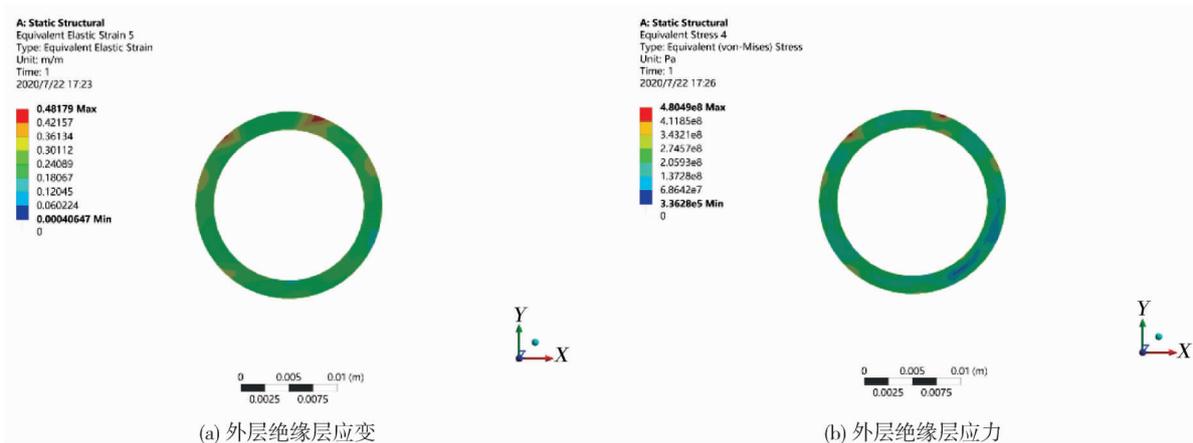


图9 100 000 N 自动划分的网格外层绝缘层分析应变、应力云图

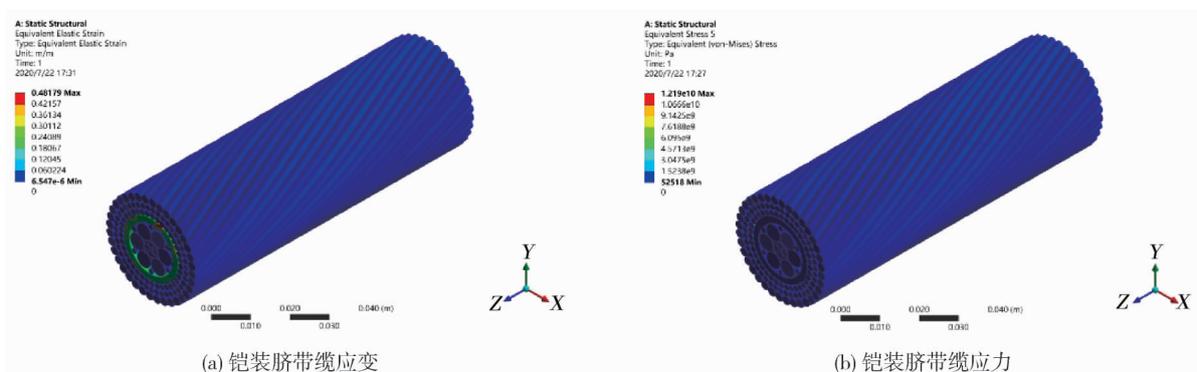


图10 100 000 N 拉力作用下铠装脐带缆应变、应力云图

同时可知,外层绝缘层所受应变最大,其原因是当铠装层钢丝承受拉伸载荷时将发生一定的弹性形变,导致外层绝缘层与铠装层发生摩擦,进而引起铠装层细微的径向变形而挤压外层绝缘层,加之外层绝缘层弹性模量较小,因此外层绝缘层产生了较大的应变。

### 3 结论

- 1) 在外部载荷作用下,铠装脐带缆主要承受部件为铠装层,其中外层铠装层承受载荷最大。
- 2) 在外部载荷作用下,在铠装层中,内层铠装层铠与铠相接触的地方出现最大应力、应变。
- 3) 在外部载荷作用下,外层绝缘层所受应变最大;而铠装脐带缆缆芯应力、应变是最小的。

### 参考文献:

- [1] 刘德顺,金永平,万步炎,等.深海矿产资源岩芯探测取样技术与装备发展历程与趋势[J].中国机械工程,2014,25(23): 3255-3265.
- [2] Budnik V, Chernyi S. Future Development of the World Ocean Mining for the Industry [J]. Procedia Engineering, 2016 (150): 2150-2156.
- [3] 张汉泉,陈奇,万步炎,等.海底钻机的国内外研究现状与发展趋势[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(1): 1-7.
- [4] Merey S. Drilling of gas hydrate reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016,35: 1167-1179.
- [5] Kelleher P, Samsuri N, Carter J, et al. Footings design for temporarily founded seabed drilling systems[C]// Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, Texas, U.S.A, 2008: 3109-3120.
- [6] 周怀瑾,金永平,万步炎,等.深海海底超深孔钻机支撑稳定性分析[J].矿业工程研究,2019,34(4): 73-78.

- [7] 万步炎,金永平,黄筱军.海底20米岩芯取样钻机的研制[J].海洋工程装备与技术,2015,2(1):1-5.
- [8] 郭宏,屈衍,李博,等.国内外脐带缆技术研究现状及在我国的应用展望[J].中国海上油气,2012,24(1):74-78.
- [9] 易吉梅.脐带缆在海洋深水石油平台的应用现状及前景分析[J].中国修船,2014,27(4):55-57.
- [10] Jin Y P, Wan B Y, Liu D S, et al. Numerical simulation of dynamic response characteristics for launch and recovery system under random irregular wave[J]. Journal of Vibroengineering, 2016,18(8): 5390-5405.
- [11] 王世文,冯继玲.弹性钢丝绳理论研究进展[J].力学进展,1999,29(4):486-500.
- [12] Hruska F H. Calculation of stresses in wire ropes [J]. Wire and wire products, 1951, 26(9): 766-767.
- [13] McConnell K G, Zemke W P. A model to predict the coupled axial torsion properties of ACSR electrical conductors [J]. Experimental Mechanics, 1982, 22(7):237-244.
- [14] Feret J J, Bournazel C L. Calculation of stresses and slip in structural layers of unbonded flexible pipes [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1987,109:263-269.
- [15] 董俊宏,王瑛剑,赵四新,等.双层铠装海底光缆抗拉强度的计算[J].光纤与电缆及其应用技术,2004(1):28-31.
- [16] 肖能,阎军,卢青针.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.
- [17] 卢青针.水下生产系统脐带缆的结构设计与验证[D].大连:大连理工大学,2013.