

产品·设计

桩腿对接缓冲器内水平缓冲件的有限元分析

陈晓娟^{1,2}, 马美琴^{1,2}

(1. 河北省深海桩基配套装备技术创新中心, 河北 衡水 053000; 2. 衡橡胶科技股份有限公司, 河北 衡水 053000)

摘要:对桩腿对接缓冲器(LMU)内水平缓冲件(HE)进行了有限元分析。结果表明:对于钢筒及其内部沿圆周方向均匀分布的12个HE组成的LMU产品(简称产品), HE材料的泊松比越大, HE的刚度越大, 但是变化幅度较小; HE与钢筒内壁的摩擦因数对HE的刚度有一定的影响, 在HE装配完成后, 须在其表面涂抹润滑脂以减小其与桩腿的摩擦因数; 在HE中嵌入钢板并改变钢板的尺寸和位置、改变HE材料特质可以增大产品的刚度; 采用12个HE沿钢筒圆周方向均匀分布的设计可满足产品的工程刚度要求, 在两种极端工况下产品的刚度偏差在1.98%之内。本研究可以提高LMU的减震效果, 有利于导管架桩腿结构在安装过程中不受破坏。

关键词:桩腿对接缓冲器; 水平缓冲件; 刚度; 有限元分析

中图分类号: TQ336.4⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)12-0967-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.12.0967



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

桩腿对接缓冲器(LMU)主要应用于桩柱式海洋平台、单柱式深海平台和近海风车等上部结构的安装, 是一种新型的用于桩腿对接的缓冲装置^[1-4]。

在桩腿的对接安装过程中, LMU的主要作用为减小上下部结构间的撞击力和限制上下部结构间的相对位移。为保证导管架桩腿结构在安装过程中不受破坏, 目前一般在LMU中设置橡胶构件以吸收桩基能量和减小撞击力, 从而使桩腿的对接定位过程顺利进行^[5-9]。为了保证橡胶构件在水平方向各角度减震水平相同, 需要将LMU设计成整环结构。由于整环结构的LMU安装难度较大, 因此采用尺寸相同的独立橡胶构件沿LMU钢筒的圆周方向均匀布置以在理论上能满足LMU的减震功能的要求, 但是对于独立橡胶构件的尺寸需要进行详细的设计。

本工作对LMU内水平缓冲件(HE)进行了有限元分析和计算, 以期提高LMU的减震效果。

基金项目: 国家发展和改革委员会科技攻关项目(CCL2020HNFN0183)

作者简介: 陈晓娟(1995—), 女, 河北衡水人, 河北省深海桩基配套装备技术创新中心和衡橡胶科技股份有限公司工程师, 学士, 主要从事海洋工程配套产品设计和研究工作。

E-mail: dsd23da@163.com

引用本文: 陈晓娟, 马美琴. 桩腿对接缓冲器内水平缓冲件的有限元分析[J]. 橡胶工业, 2023, 70(12): 967-973.

Citation: CHEN Xiaojuan, MA Meiqin. Finite element analysis of horizontal buffer elements in pile leg butt joint buffer[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(12): 967-973.

1 有限元仿真

1.1 三维模型的建立

根据HE的建议尺寸及组合LMU产品(包括钢筒及其内部沿圆周方向均匀分布的12个HE, 以下简称产品)平面图, 通过CATIA软件创建了产品的三维模型^[10-11]。因HE与钢筒需要通过螺栓连接, 在HE靠钢筒的一端设置一层连接用的钢板, 钢板与HE之间进行粘接。

1.2 网格划分

采用CATIA软件先将产品的三维模型另存为STP格式, 然后将模型导入到Hypermesh软件中以划分网格(见图1)。网格划分中橡胶材料设为不可压缩材料, 使用杂交单元C3D8H(计算更容易收敛); 金属材料使用非协调单元C3D8R; 由于钢板与HE之间粘接, HE与内嵌钢板的网格节点重合^[12]。

1.3 施加载荷工况和选用材料模型

1.3.1 施加载荷工况

将Hypermesh软件中划分的产品网格以inp格



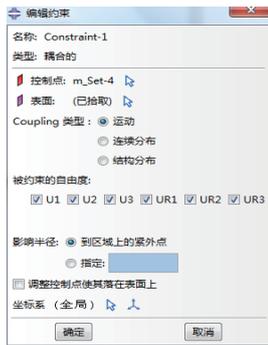
图1 产品的钢筒和12个HE的有限元网格

Fig. 1 Finite element grids of product steel cylinder and 12 HE

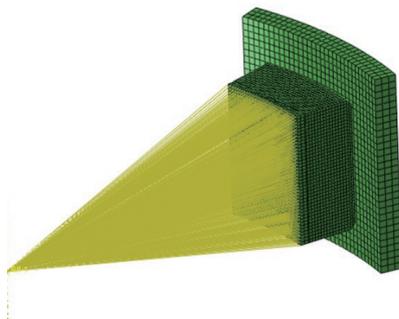
式导入到Abaqus软件中,设置好边界条件和约束,施加位移载荷。

在产品圆心位置建立一个参考点,创建运动耦合约束,使参考点与HE耦合在一起,类似刚性焊接(见图2)。同步处理后,在计算过程中将对产品的计算工况施加到参考点上以避免错误选择作用面,使计算工况施加更精准。

HE与钢筒之间有10 mm的间隙,随着HE径向移动,间隙消除,HE与钢筒产生接触。因此,HE和



(a) 约束编辑界面



(b) 约束示意

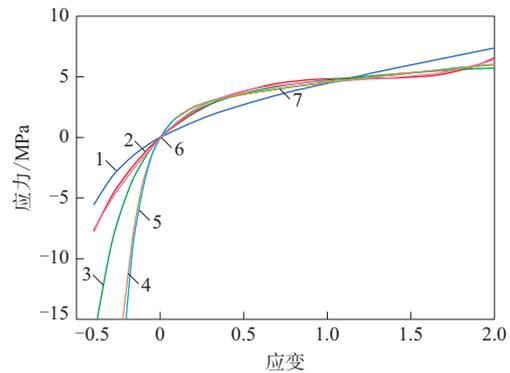
图2 耦合约束

Fig. 2 Coupling constraint

钢筒之间需要建立接触约束,定义接触的切向行为和法向行为。

1.3.2 选用材料模型

本工作HE的材料为聚氨酯材料(万华化学股份有限公司产品,刚度为709 kN@50 mm,即在709 kN的压力会产生50 mm的压缩位移,如无特殊说明,下同),对其进行单轴拉伸试验,试验曲线及各本构模型拟合曲线^[13-16]如图3所示。



1—Neoh模型曲线;2—Yeoh模型曲线;3—Mooney Rivlin模型曲线;4—Ogden 2模型曲线;5—Ogden 3模型曲线;6—Van Der模型曲线;7—试验曲线。

图3 聚氨酯材料的试验曲线及各本构模型拟合曲线
Fig. 3 Test curve and various constitutive model fitting curves of polyurethane materials

从图3可以看出:对于聚氨酯材料,应力和应变的试验数据只有正值;在应变大于0时,除了Neoh模型外,其他5种本构模型均拟合较好;在应变小于0时,各本构模型相差较大,其应力绝对值从大到小依次为:Ogden 3,Ogden 2,Mooney Rivlin, Van Der, Yeoh和Neoh;Yeoh模型拟合曲线与试验曲线最接近,拟合程度高,故本工作采用Yeoh模型作为HE的聚氨酯材料本构模型。

2 结果与讨论

2.1 计算参数的选取

2.1.1 泊松比

泊松比是指材料在单向拉伸或压缩时,横向应变与轴向应变绝对值的比值,也叫横向变形系数,是反映材料横向变形的弹性常数。超弹性材料的泊松比一般在0.450~0.499之间,完全不可压缩材料的泊松比为0.5。为了探究HE材料的泊松比对HE仿真刚度的影响,在Abaqus软件中分别

赋予HE材料不同的泊松比,采用Yeoh本构模型,计算单个HE的刚度。HE的刚度-泊松比曲线如图4所示。

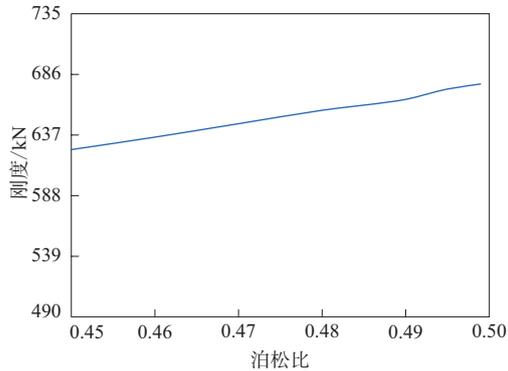


图4 HE的刚度-泊松比曲线

Fig. 4 Stiffness-Poisson's ratio curve of HE

从图4可以看出,HE材料的泊松比越大,HE的刚度越大,但是增幅较小。本工作HE材料的泊松比取0.49^[12]。

2.1.2 HE的摩擦因数(相对于钢筒内壁)

分别计算不同摩擦因数的HE的刚度,其与摩擦因数的曲线如图5所示。

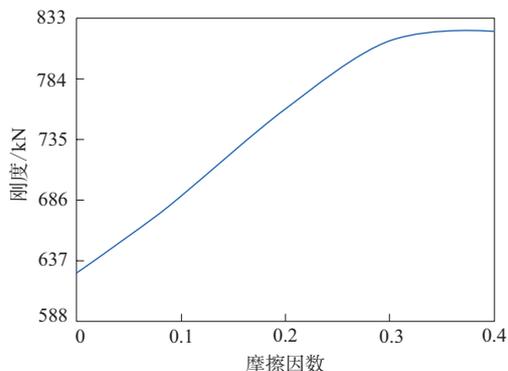


图5 HE的刚度-摩擦因数曲线

Fig. 5 Stiffness-friction coefficient curve of HE

从图5可以看出:摩擦因数从0开始增大时,HE的刚度变化较大;当摩擦因数大于0.3后,HE的刚度变化不大,因为摩擦力达到极限后,HE与钢筒之间几乎没有相对滑动,HE的刚度几乎不再随摩擦因数的增大而改变。

不同摩擦因数的HE的应变云图如图6所示。

从图6可以看出,HE的摩擦因数越大,HE与钢筒内壁间产生的摩擦力越大,约束了HE在钢筒内

壁的延伸和变形,从而增大了HE的刚度。

因此,HE的摩擦因数对刚度有一定的影响,在HE装配完成后,须在HE的表面涂抹一定的润滑脂以减小其与桩腿间的摩擦因数。本工作HE的摩擦因数取0.07^[12]。

2.2 产品的刚度调整

产品内HE的整体工况随船体、海况不同而不同,需要进行定制化设计。本工作根据工程上较多要求的产品的刚度(4 900 kN@50 mm)进行设计。由于选用的HE的刚度很小(709 kN@50 mm),需要对产品的刚度进行调整以满足设计要求。

目前,增大产品的刚度方式主要有:扩大产品的外观尺寸,增大产品的形状系数;保持产品的尺寸不变,在产品内部增加骨架材料,通过调整骨架材料的类别、分布等调整产品的刚度;维持产品的尺寸不变,更换较高弹性模量的弹性材料。

2.2.1 改变HE的结构

在HE原结构中,底部钢板是安装时用的,尺寸和位置不变。在HE原结构中另嵌入钢板,改变嵌入钢板的尺寸和位置以调整HE的刚度。嵌入钢板的HE结构如图7所示,其中 R_1 和 R_2 分别为中层和上层钢板的曲率半径,边距为外层钢板边缘到HE聚氨酯材料边缘的距离。

在满足边距为20 mm以上的条件下,改变钢板的数量、位置和厚度,分别计算HE的刚度,结果如表1所示。

从表1可以看出,方案5的HE刚度为4 811.8 kN,接近4 900 kN@50 mm的要求。因此,在HE原结构中嵌入两层钢板,可以提高产品的刚度。

2.2.2 改变HE的材料特质

选用定伸应力较大的聚氨酯材料,以使HE的刚度满足要求。将所用聚氨酯材料的应力-应变曲线导入Abaqus软件中,可以计算单个HE的刚度。

2.2.3 HE的整体刚度

采用选定的HE的材料本构模型计算HE的整体刚度。由于12个HE一起运动,需要将它们分别与参考点建立耦合约束。产品整体均匀设置后的布置工况及加载后的位移云图如图8所示。

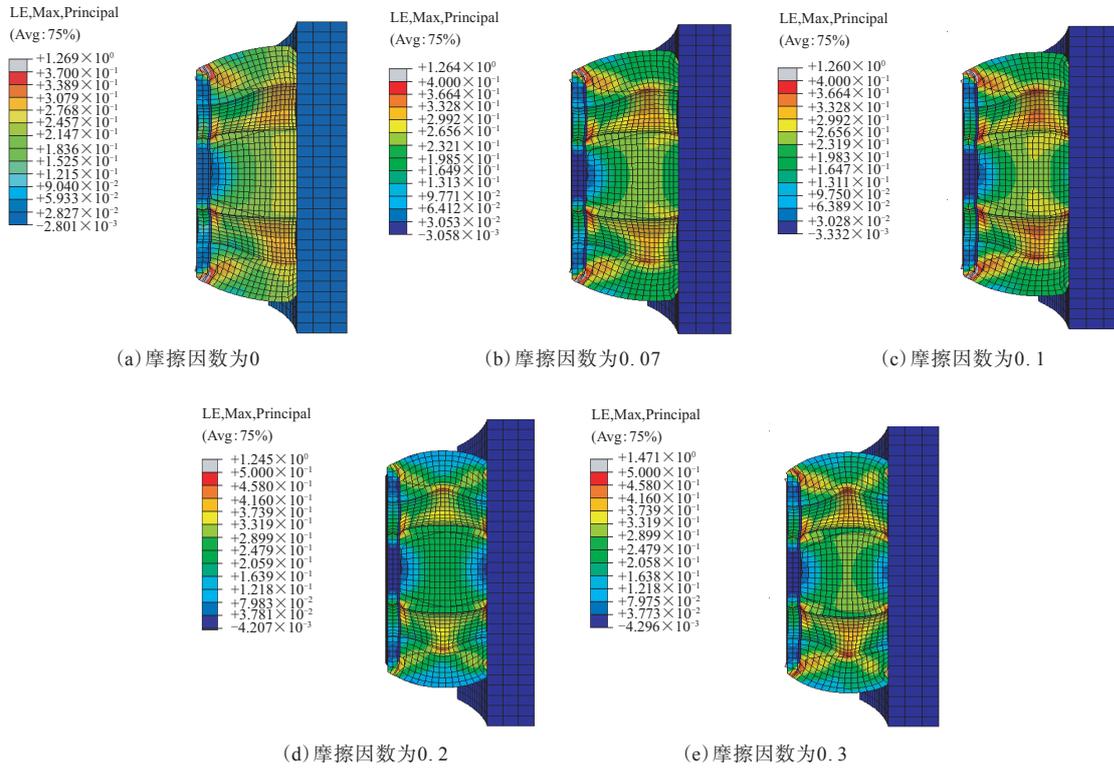


图6 不同摩擦因数的HE的应变云图

Fig. 6 Strain nephograms of HE with different friction coefficients

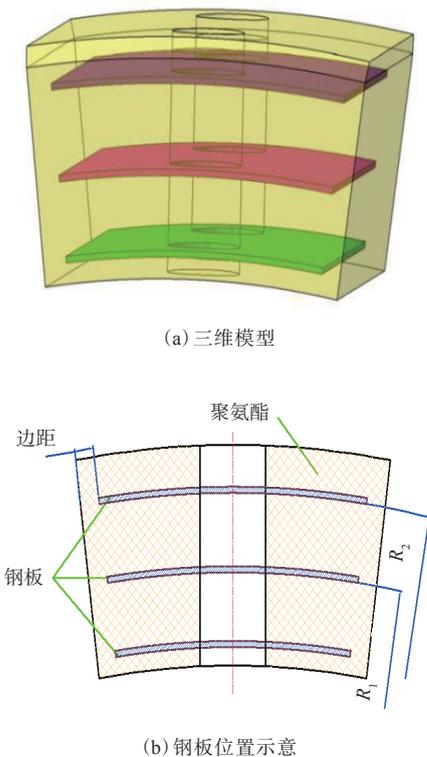


图7 嵌入钢板的HE结构

Fig. 7 Structure of HE embedded steel plates

表1 嵌入钢板的HE刚度

Tab. 1 Stiffnesses of HE embedded steel plates

方案	钢板 ¹⁾		边距 ²⁾ / mm	HE的刚 度/kN
	数量/个	位置/mm		
1	1	$R_1=1\ 042$	20	3 185. 0
2	1	$R_1=1\ 062$	20	3 400. 6
3	1	$R_1=1\ 082$	20	3 498. 6
4	1	$R_1=1\ 112$	20	3 253. 6
5	2	$R_1=1\ 032, R_2=1\ 082$	20	4 811. 8

注:1)厚度为3 mm;2)不得小于20 mm。

采用不同弹性模量聚氨酯材料的HE的整体刚度和单个刚度如表2所示。

经过分析,HE的整体刚度与单个刚度之间存在一定的比例关系(见表3),可以用于后续产品的检测中,通过检测HE的单个刚度实现对产品的整体刚度的推算。

2.2.4 不同工况下产品的刚度

对于沿钢筒圆周方向均匀布置安装的多个HE,由于桩腿与HE接触的数量不同,各HE的作用反力不同。为了保证产品在使用过程中多个均匀分布的HE提供的各方向反力尽量稳定一致,需要对加载位置引起的HE的反力偏差进行两个极端位

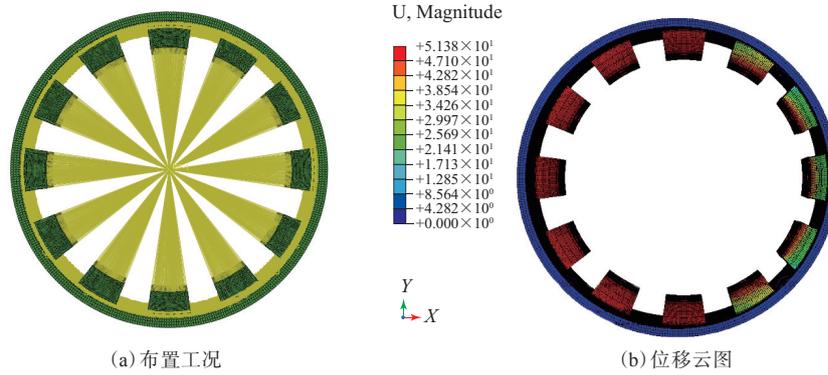


图8 HE的整体仿真结果
Fig. 8 Overall simulation results of HE

表2 采用不同弹性模量聚氨酯材料的HE的刚度
Tab. 2 Stiffnesses of HE using polyurethane materials with different elastic moduli

HE的压缩位移/mm	HE的单个刚度/kN		HE的整体刚度/kN	
	摩擦因数为0	摩擦因数为0.07	摩擦因数为0	摩擦因数为0.07
聚氨酯材料的弹性模量为 $6.1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$				
10	110.209	114.700	259.652	273.485
20	231.379	242.000	616.354	653.995
30	361.473	380.100	1 007.180	1 073.430
40	496.676	525.700	1 419.810	1 519.980
50	630.163	672.600	1 841.950	1 982.010
聚氨酯材料的弹性模量为 $12.2 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$				
10	220.347	229.013	518.464	544.876
20	462.581	483.235	1 230.710	1 383.690
30	722.344	759.106	2 011.120	2 138.830
40	991.744	1 049.730	2 835.160	3 027.720
50	1 258.750	1 343.360	3 678.340	3 947.910
聚氨酯材料的弹性模量为 $18.3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$				
10	330.284	343.000	777.136	816.699
20	693.387	724.000	1 844.760	1 953.020
30	1 082.800	1 137.000	3 014.630	3 205.910
40	1 486.710	1 573.000	4 250.030	4 538.410
50	1 887.150	2 013.000	5 514.330	5 918.000

表3 HE的整体刚度与单个刚度的比例系数
Tab. 3 Ratio coefficients of overall stiffnesses to single stiffnesses of HE

HE的压缩位移/mm	比例系数	HE的压缩位移/mm	比例系数
10	2.4	40	2.9
20	2.7	50	2.9
30	2.8		

置(单个HE的正向和两个HE的中间位置)的计算。加载工况如下:工况1是位移沿着X轴方向,即径向压缩位移方向正好落在1个HE的中心;工况2是位移与X轴成 45° ,即径向压缩位移方向落在2个HE中间。在两种工况下、HE的压缩位移为50 mm

时,产品的应变云图如图9所示。

从图9可以得出,在工况1下产品的刚度为5 144.61 kN,在工况2下产品的刚度为5 042.88 kN。从理论计算可知,相对于工况1,在工况2下产品的刚度偏差为1.98%,即满足工况1要求的HE的刚度一般也适合于工况2的要求。因此采用12个HE沿钢筒均匀分布的设计可满足产品的工程刚度要求。

3 结论

本工作对LMU(产品)内HE进行了有限元分析和计算,得出如下结论。

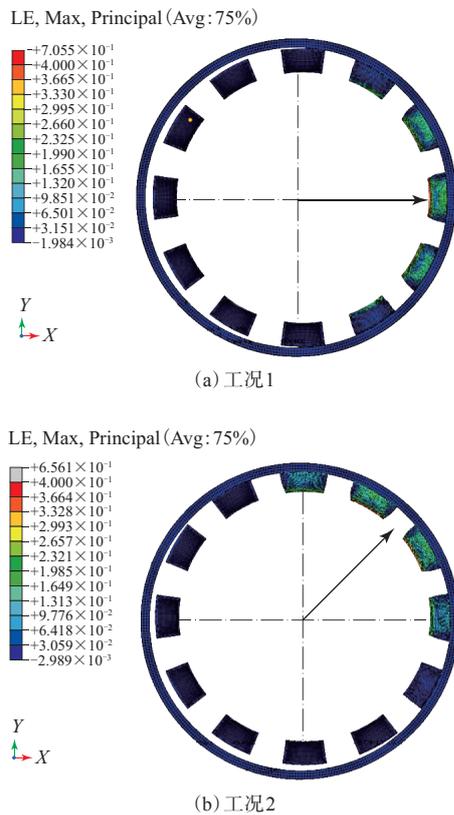


图9 不同工况下产品的应变云图

Fig. 9 Strain nephograms of products under different working conditions

(1) HE材料的泊松比越大, HE的刚度越大, 但变化幅度较小; HE的摩擦因数对其刚度有一定的影响, 在HE装配完成后, 须在其表面涂抹一定的润滑脂以减小其与桩腿的摩擦因数。

(2) 在HE中嵌入钢板并改变钢板的尺寸和位置以及HE的材料特质可以提高产品的刚度。

(3) 采用12个HE沿钢管圆周方向均匀分布的设计可满足产品的工程刚度要求, 在两种极端工况下产品的刚度偏差在1.98%之内。

该研究可以提高LMU的减震效果, 有利于导管架桩腿结构在安装过程中不受破坏。

参考文献:

[1] 于建峰, 齐小平, 谢公涛, 等. 导管架与上部模块连接结构型式的适应性分析及发展应用[J]. 石油和化工设备, 2022, 25(12): 40-42.
YU J F, QI X P, XIE G T, et al. Adaptability analysis and development application of the connection structure between the jacket and the upper module[J]. Petro & Chemical Equipment, 2022, 25(12): 40-42.

[2] 石晓, 杜哲铭. 基于Workbench软件桩腿耦合装置的静力分析[J]. 电子质量, 2020(7): 29-33.
SHI X, DU Z M. Static analysis of LMU based on Workbench software[J]. Electronics Quality, 2020(7): 29-33.

[3] 刘博, 彭甲志, 马晋雄, 等. 浅析导管架平台浮托安装的动态时域模拟[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(11): 105-106.
LIU B, PENG J Z, MA J X, et al. Analysis of dynamic time domain simulation for floating installation of jacket platforms[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(11): 105-106.

[4] 高博或. LMU海上安装流程及注意事项[J]. 商品与质量, 2021(36): 219.
GAO B Y. LMU offshore installation process and precautions[J]. Product and Quality, 2021(36): 219.

[5] 李新超, 韩士强, 阮志豪. 新型倒置式桩腿耦合缓冲装置创新设计[J]. 中国水运, 2021(4): 71-73.
LI X C, HAN S Q, RUAN Z H. Innovative design of a new inverted pile leg coupling buffer device[J]. China Water Transport, 2021(4): 71-73.

[6] 李凯, 李新超, 刘保权, 等. LMU弹性缓冲系统配方设计研究[J]. 当代化工研究, 2018(5): 164-165.
LI K, LI X C, LIU B Q, et al. Research on formula design of LMU elastic buffer system[J]. Modern Chemical Research, 2018(5): 164-165.

[7] 樊锡勋. 浮托安装的LMU结构优化设计[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
FAN X X. Optimization design of LMU structure for floating installation[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018.

[8] 汪敬翔. 基于快速载荷转移技术的浮托安装全过程耦合动力响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
WANG J X. Research on coupled dynamic response of floating installation process based on fast load transfer technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[9] 刘丽红, 刘锦昆, 蒋习民, 等. 橡胶圈层数对桩腿耦合装置性能影响研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(2): 110-118.
LIU L H, LIU J K, JIANG X M, et al. Research on the effect of rubber ring layers on the performance of pile leg coupling device[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(2): 110-118.

[10] 沈玉宝, 阚俊伟, 贾攀攀. 海上换流站柱腿与LMU连接强度计算与分析[J]. 中国水运, 2022, 22(4): 53-55.
SHEN Y B, KAN J W, JIA P P. Strength calculation and analysis of the connection between the legs of offshore converter stations and LMU[J]. China Water Transport, 2022, 22(4): 53-55.

[11] 王本添. 导管架平台浮托安装数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
WANG B T. Numerical simulation study on floating installation of jacket platform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

- [12] 江新伟,李新超. LMU缓冲件有限元结构设计[J]. 科学技术创新, 2018(13):8-9.
JIANG X W, LI X C. Finite element structural design of LMU buffer components[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2018(13):8-9.
- [13] 朱艳峰,刘锋,黄小清,等. 橡胶材料的本构模型[J]. 橡胶工业, 2006(2):119-125.
ZHU Y F, LIU F, HUANG X Q, et al. Constitutive models of rubber materials[J]. China Rubber Industry, 2006, 53(2):119-125.
- [14] 黄敏,黄舟,贾东,等. 基于压缩试验的两种橡胶材料本构模型分析[J]. 噪声与振动控制. 2018, 38(z1):483-486.
HUANG M, HUANG Z, JIA D, et al. Constitutive models of two kinds of rubber material based on compression tests[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(z1):483-486.
- [15] 王永冠,李心,黄友剑. 橡胶计算中本构模型的选择[C]. 第四届全国橡胶制品技术研讨会论文集. 北京:中国化工学会和中国汽车工程学会,2007.
- [16] 李昊,肖光辉,贺才春,等. 基于不同本构模型的弹性联轴器刚度特性分析[J]. 橡胶工业, 2020, 67(7):529-533.
LI H, XIAO G H, HE C C, et al. Stiffness characteristic analysis of resilient coupling based on different constitutive models[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(7):529-533.

收稿日期:2023-06-01

Finite Element Analysis of Horizontal Buffer Elements in Pile Leg Butt Joint Buffer

CHEN Xiaojuan^{1,2}, MA Meiqin^{1,2}

(1. Technical Innovation Center of Supporting Equipment for Deep-sea Pile Foundation in Hebei Province, Hengshui 053000, China; 2. Hengxiang Technology Co., Ltd, Hengshui 053000, China)

Abstract: Finite element analysis was performed on the horizontal buffer element (HE) in the pile leg butt joint buffer (LMU). The results showed that for LMU products (referred to as the product) composed of the steel cylinder and its interior 12 HE evenly distributed along the circumference of the steel cylinder, the higher the Poisson's ratio of HE material was, the greater the stiffness of HE was, but the stiffness variation was small. The friction coefficient between HE and the inner wall of the steel cylinder had a certain impact on the stiffness of HE. After HE assembly was completed, lubricating grease should be applied on its surface to reduce the friction coefficient with the pile leg. Embedding steel plates in HE and changing the size and position of the steel plates, as well as changing HE material characteristics, could increase the stiffness of the product. The design with 12 HE evenly distributed along the circumference of the steel cylinder could meet the engineering stiffness requirements of the product, and the stiffness deviation of the product was within 1.98% under two extreme working conditions. This study could improve the shock absorption effect of LMU, which was beneficial for preventing damage to the pile leg structure of the jacket during installation.

Key words: pile leg butt joint buffer; horizontal buffer element; stiffness; finite element analysis

专利

由山东亿和橡胶输送带有限公司申请的专利(公布号 CN 116619791A, 公布日期 2023-08-22)“一种钢丝绳绕制芯层的阻燃输送带及制备工艺”, 提供了一种钢丝绳绕制芯层的阻燃输送带的制备工艺。该阻燃输送带生产线的冷压机一侧设置有用对钢丝绳表面进行环形冲洗的清洁单元, 清洁单元与冷压机之间设置有用去除钢丝

绳表面水分的干燥单元。本发明在钢丝绳与粘合胶和覆盖胶进行冷压成型前将钢丝绳表面清洁干净, 可以保证钢丝绳与粘合胶的粘合强度, 延长钢丝绳芯输送带的使用寿命, 提高产品质量。本发明阻燃输送带覆盖胶的组分为天然橡胶、丁苯橡胶、炭黑、硅石灰、阻燃氧化铝、增塑剂、抗氧剂、抗臭氧剂。

(信息来源于国家知识产权局)