

海底电缆扭转损伤的参量化评价方法

吕安强^{a,b}, 李 婷^a

(华北电力大学 a. 电子与通信工程系; b. 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:海底电缆在运输、敷设过程中,不可避免地会发生扭转,若扭转角度过大,会对其造成不可恢复的损伤。本文利用有限元方法建立了海底电缆的扭转模型,通过分析应力、应变的时空分布特点,确定了能够有效反映海缆力学特性的特征参量,制定了扭转故障发生时各特征参量的阈值,建立了能够表征海底电缆扭转行为的力学参量体系。结果表明:海缆发生扭转初期,其轴向各结构应力分布较为均匀;随着扭转角度的增加,缆体轴向应力分布会出现波动,可建立包括铜导体应力、XLPE绝缘层应力、铅合金护套应力、铠装层应力和扭转角度的参量体系,对海缆扭转行为进行参量化评价。

关键词:海底电缆;扭转损伤;参量体系;评价方法;有限元

中图分类号:TM247 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.11.017

Parametric evaluation method for torsion damage of submarine cables

LÜ Anqiang^{a,b}, LI Ting^a

(a. Department of Electronic and Communication Engineering; b. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In the process of transportation and laying, the submarine cable will inevitably be twisted. If the twisting angle is too large, it will cause irreparable damage for the submarine cable. In this paper, a torsion model of submarine cable was established by finite element method, and the characteristic parameters that can effectively reflect the mechanical characteristics of submarine cable were determined by analyzing the temporal and spatial distribution characteristics of stress and strain. The threshold values of each characteristic parameter when torsion failure occurred were established, and the mechanical parameter system that can represent the torsion behavior of submarine cable was established. The results show that the axial stress distribution of the submarine cable is more uniform at the initial stage of torsion. With the increase of torsion angle, the axial stress distribution of cable body will fluctuate. A parametric system including copper conductor stress, XLPE insulating layer stress, lead alloy stress, armor layer stress, and torsion angle can be established for parametric evaluation of submarine cable torsion behavior.

Key words: submarine cable; torsion damage; parameter system; evaluation method; finite element

0 引言

近年来,我国海洋事业快速发展,海底电缆正扮演着不可或缺的重要角色^[1-3]。海底电缆内部结构复杂,在装载、运输和敷设过程中,容易发生扭转,若不及时处理,导致海缆在运行时产生一定程度的风险^[4]。由于海底环境复杂,若海缆发生故障,对其进行检修费时费力^[5],对正常电力供应也会造成严重影响,所以如何准确、快速地对海缆健康状态进行评估和诊断十分关键^[6-11]。

目前,很多学者对海底电缆的机械故障进行了研究,但对海底电缆扭转状态的研究却很少。文献[12-13]利用有限元方法建立单芯海底电缆扭转模

型,分析了铜导体受力情况以及不同扭转速度对铜导体应力/应变的影响;文献[14]建立了三芯海底电缆有限元扭转模型,得到不同扭转速度、不同扭转方向下海底电缆各层结构的应力及光纤应变曲线,并利用最小二乘法拟合得到了二者之间的函数关系;文献[15]以220 kV三芯光纤复合海缆作为研究对象建立了有限元模型,分析在扭转过程中海缆各层结构发生屈服的先后顺序和扭转角度对各层结构的受力影响。以上研究都是对海缆扭转过程中各层结构受力情况的分析,没有对海缆扭转时本身健康状态进行整体评估及分析判断,很难用于海缆实际的状态监测。

本文利用有限元法对110 kV交联聚乙烯(XLPE)光纤复合海底电缆的扭转模型进行研究分

析,仿真求解并提取海缆不同扭转方向、不同扭转速度下的各层结构应力数据,找出与海缆健康状态相关的关键参量,分析各参量的变化与分布规律,建立表征海缆扭转损伤的力学参量体系。

1 海缆建模

1.1 海缆剖面结构

本文所用海缆为YJQ41型12层单芯XLPE绝缘光纤复合海缆,其剖面结构如图1所示。其中,非绞合层结构包括铜导体、导体屏蔽、XLPE绝缘、绝缘屏蔽、半导体电阻水带、铝合金护套、沥青防腐层、HDPE(高密度聚乙烯塑料)护套、内衬层和综合外被层。海缆里侧的绞合层由光单元和PET填充条构成,绞合节距为86 cm;海缆外侧绞合层结构由铠装层构成,绞合节距为140 cm,且这两层的绞合方向相反。本文所用海缆的长度为20 cm。

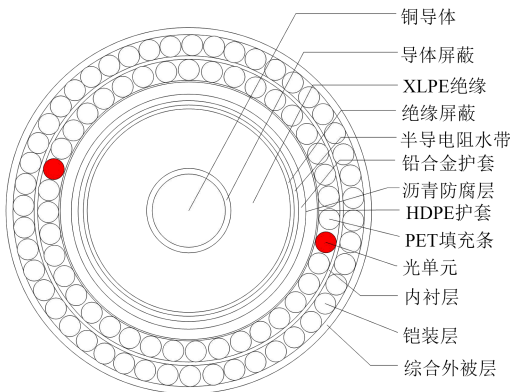


图1 海缆剖面结构图

Fig.1 Structure diagram of submarine cable section

1.2 海缆有限元模型

海缆结构复杂,有限元仿真计算量大、计算时间长,故需要对海缆扭转的有限元模型进行简化。其中,导体屏蔽、绝缘屏蔽以及半导体电阻水带结构的材料相似,尺寸参数较小,故将其与性能相近的XLPE绝缘合并为绝缘层;对于内衬层和综合外被层(内衬层和综合外被层包括了黄铜带、绳被层和PP外被层),其主要功能为抗凿船虫以及标记便于识别海缆,并且其厚度不到整体外径的1/20,在建模过程中可以忽略。最终将海缆模型各层结构简化为铜导体、XLPE绝缘层、铝合金护套、HDPE护套、光单元、PET填充条和铠装层(其中光单元和PET填充条为1层结构)共6层结构。简化前后海缆的各层结构尺寸如表1所示。

有限元模型网格划分的质量关系着仿真结果的正确与否。不同结构选用合适的网格划分方式,能够有效提高结果精度,缩短求解时间。本文海缆

表1 简化前后海缆的各层结构尺寸

Tab.1 The each structure size of submarine cable before and after simplification

结构	mm			
	简化前		简化后	
	外径	厚度	外径	厚度
铜导体	20.8	10.4	20.8	10.4
导体屏蔽	22.8	1.0	—	—
XLPE绝缘	59.8	18.5	61.8	20.5
绝缘屏蔽	61.8	1.0	—	—
半导体电阻水带	64.3	1.25	—	—
铝合金护套	72.3	4.0	72.3	5.25
沥青防腐层	72.8	0.25	—	—
HDPE护套	82.4	4.8	82.2	4.95
PET填充条、光单元(两根)	94.4	6.0	89.2	6.0
内衬层	97.4	1.5	—	—
铠装层	109.4	6.0	96.2	6.0
综合外被层	114.7	2.5	—	—

扭转模型采用映射网格划分和体扫掠网格划分的方式,得到的模型横截面效果图如图2所示。

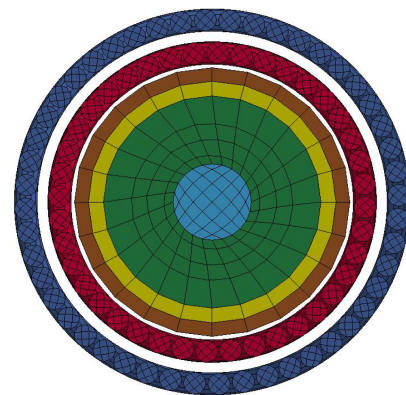


图2 海缆有限元模型网格划分

Fig.2 Submarine cable finite element model meshing

为了使模型能够尽可能正确地模拟海缆扭转过程,在施加载荷时,要对海缆一端设置约束,使其固定不动,对另一端施加扭转角速度载荷。根据相关文献记载^[6],海缆在敷设或倒缆时的卷绕速度为1~2 r/min,在实际工程中海缆的扭转速度约为4°/s。故本文对模型施加4°/s沿顺时针(沿光单元绞合方向)和逆时针扭转30°的扭转载荷。

在模型求解过程中,若单元计算时的积分点数少于实际个数,就会产生沙漏能。当沙漏能小于总能量的5%时,认为该模型有限元仿真的结果正确^[17]。本模型求解所得的沙漏能与内能变化规律如图3所示。从图3可以看出,沙漏能维持在内能的1%以内,表明此模型所得结果正确。

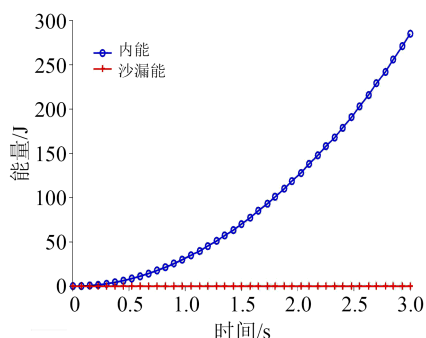


图3 内能/沙漏能随时间变化曲线

Fig.3 Internal energy/hourglass energy change curves with time

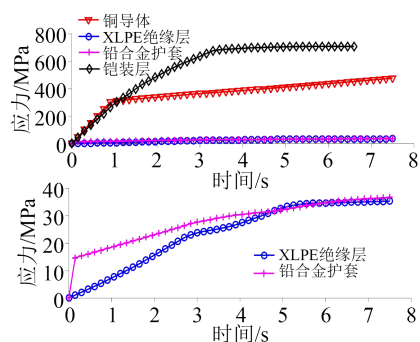
2 数据分析与参量确定

2.1 模型数据分析

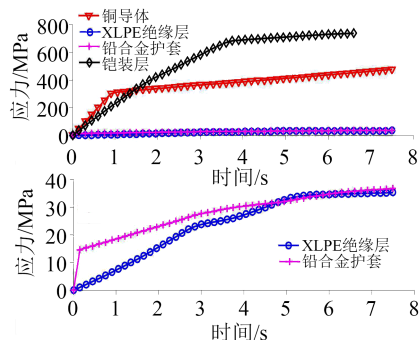
扭转角速度为 $4^{\circ}/s$ 、载荷施加3.45 s时,对海缆右端面进行约束控制,扭转角度为 0° ,左端面发生扭转,此时缆体扭转角度为 13.8° 。

为更清楚地对比分析在不同扭转方向下各层结构应力变化情况,分别绘制了不同扭转方向时铜导体、XLPE绝缘层、铝合金护套和铠装层结构应力随时间变化的曲线,结果如图4所示。

从图4可以看出,①对于非绞合层结构(即铜导体、XLPE绝缘层和铝合金护套),其应力变化几乎



(a)顺时针扭转



(b)逆时针扭转

图4 海缆各层结构应力随时间变化曲线

Fig.4 Stress curves of each layer structure of submarine cable with time

不受扭转方向的影响;对于绞合层结构(即铠装层),海缆沿顺时针扭转时其应力随时间的增长速率大于其沿逆时针扭转时的增长速率。②在弹性阶段内,各层结构应力都随时间呈线性增长趋势,其中铝合金护套应力增加速率最快。随后,铜导体、铠装层、XLPE绝缘层依次达到屈服应力值,进入塑性应变阶段,各层应力以小于弹性阶段速率线性增加或逐渐趋于稳定。

由此可知,海缆在发生扭转行为时,铝合金护套与铜导体最先发生变形,导致缆体破损,加速绝缘层老化,引起绝缘电场畸变,造成海缆输电问题,影响海缆正常使用。

根据海缆各层结构应力变化数据,绘制了海缆铜导体应力数据的空间曲线,结果如图5所示。从图5可以看出,在海缆的同一位置处,铜导体结构所受应力不断变大且变化较平稳;不同位置处(即缆体轴向上)的结构应力变化分布较为均匀。随海缆扭转时间的增加,扭转角度随之变大,各层结构开始进入塑性应变阶段,此时各层结构轴向应力分布出现不同程度的波动。因此,海缆扭转行为对缆体造成的损伤程度较为均匀,即受损伤面积较大,所以海缆一旦受到外界强力扭转,将会发生短路、漏电、断裂等可能。

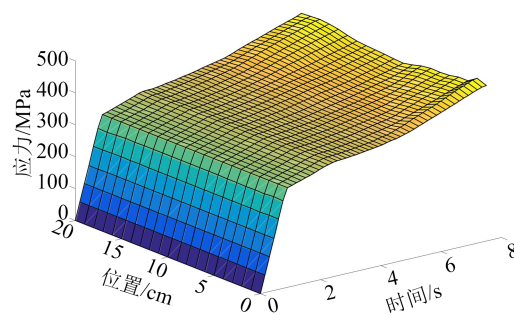


图5 海缆铜导体应力分布图

Fig.5 Stress distribution diagram of the copper conductor in submarine cable

2.2 关键参量确定

海底电缆主要用于水下传输大功率电能,其各层结构的健康状态决定了海缆能否正常使用。其中,铜导体是实现海缆功能的重要结构,若海缆受到外力作用时,导致内部用于传输电能的铜导体断裂,将直接影响用户用电,甚至造成停电事故的发生。XLPE绝缘层的完好能够保障电能的有效传输,若其受到损伤发生变形会产生放电,导致绝缘场强分布不均,易造成击穿^[18-19]。铝合金护套主要作用是保护绝缘层不被海水浸入,减少绝缘层老化现象,但由于铝合金材料本身较脆,若遭到破坏会

有开裂的风险。铠装层用于保护海缆结构的完整,其损伤程度将直接影响海缆的力学性能。

在发生机械扭转的过程中,海缆缆体会产生形变,形变的程度由材料本身的弹性和塑性特点决定。该模型中各层结构材料的弹塑性应力变化主要分为3个阶段:当应力值处于弹性阶段内时,若材料不再受到外力作用,其产生的变形可完全恢复;当应力值处于屈服阶段后,材料会发生明显的塑性应变,即使材料不再受外力作用,其变形也不可恢复;当材料处于屈服强化阶段时,可以对变形进行抵抗,但当应力超过强度极限后,材料会产生不可逆转的损伤。

海缆在发生扭转的过程中,对各关键层结构都会造成较大的伤害。本文绘制了各层结构应力-塑性应变曲线图,结果如图6所示。下面以铜导体图6(a)为例进行分析,图6(b)~6(d)与之类似。

从图4可知,在弹性阶段各层应力的增长速度较快,若等到应力值达到弹性极限时再进行预警,则不能为海缆修复工作提供较长的准备时间,存在安全隐患。由此,本文取海缆应力值的60%作为初始预警值,既为保障海缆稳定运行起到预示作用,又为接下来观察其损伤状态提供充裕时间。

从图6(a)可以看出,铜导体材料的弹性极限值约为271 MPa,屈服极限值(即屈服应力值)约为310 MPa,强度极限值约为480 MPa。故本文设置铜导体材料的弹性极限值为报警值,此时所受应力较大,但若能及时发现隐患,使缆体不再继续受力,那么铜导体材料所产生的形变便可完全恢复,海缆仍可以继续运行;当应力值增大到屈服极限值(即达到屈服应力)时,铜导体开始进入塑性应变阶段,此时即使材料不再受外力作用,缆体也不可进行自我修复,所以认为此时海缆缆体已受到严重损伤;当达到强度极限值时,铜导体已经发生了彻底的塑性应变,此时对海缆造成不可逆的损伤,认为海缆损伤达到了非常严重的情形。

在海缆发生扭转的过程中,缆体扭转角度以及海缆各层结构所受应力变化极为重要,其对于海缆能否正常运行关系重大。当扭转角度超过缆体承受极限、各层结构应力值大小超过材料屈服值时,海缆各层结构的材料特性会受到严重破坏,进而导致海缆的输电功能遭到破坏。

一般来说,海缆自身允许的最大扭转角度为11~12°/m。为分析海缆在扭转过程中扭转角度变化对各层结构的影响,本文绘制了各层应力与扭转角度的曲线图,结果如图7所示。从图7可以看出,铅

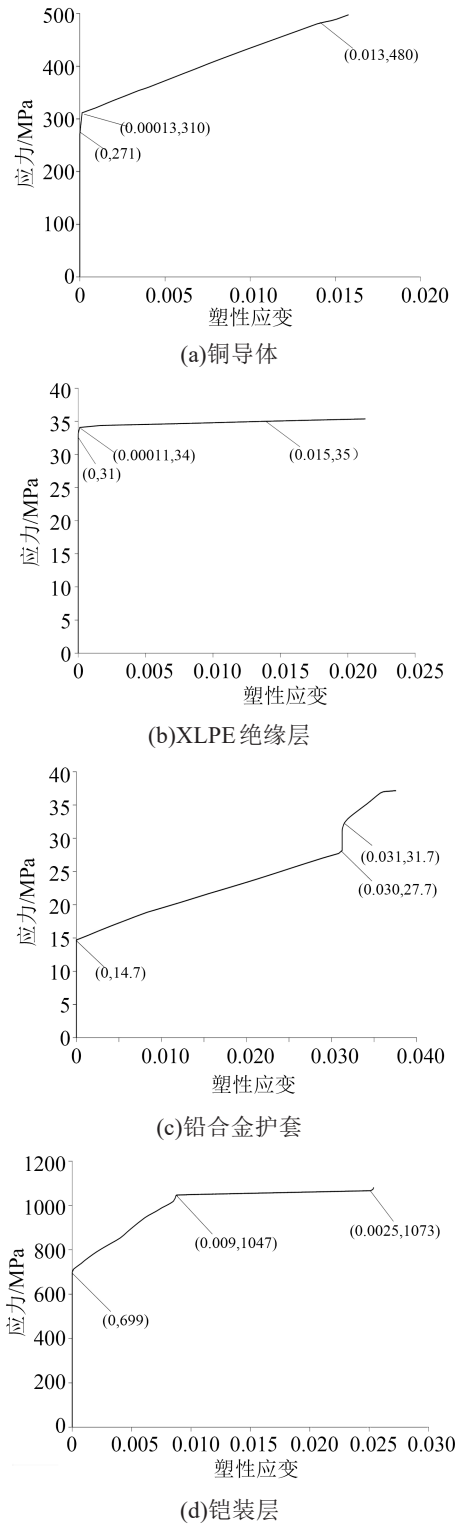


图6 各层应力-塑性应变曲线图

Fig.6 Stress-plastic strain curves for each layer

合金护套应力在弹性阶段内随扭转的角度增加速率和塑性阶段的速率相差很大,考虑到其弹性阶段内应力变化较快,此时海缆缆体未受到损伤。但为了防止缆体出现更大程度的扭转,本文设置铅合金护套应力达到其屈服应力值的60%,即海缆扭转角度为0.36°(1.8°/m)时为预警值;设置海缆扭转角度

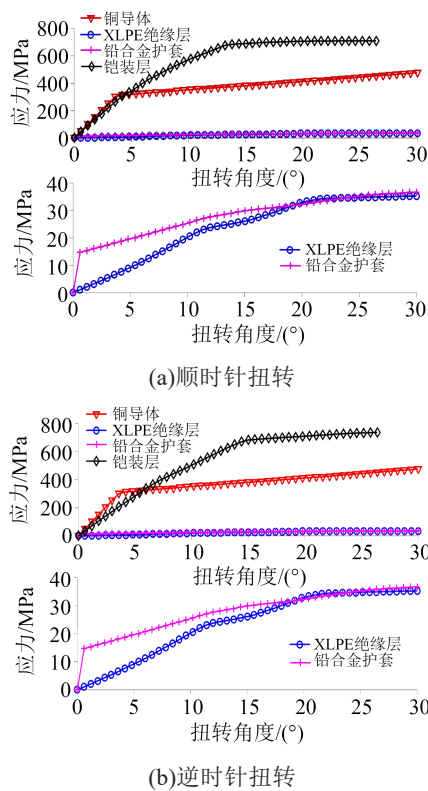


图7 各层应力-扭转角度曲线图

Fig.7 Stress-torsion angle diagram for each layer

达到 0.6° ($3^\circ/\text{m}$)时为报警值,此时铝合金护套开始发生屈服,存在开裂的风险,可能导致绝缘层、铜导体受到破坏。由于海缆自身允许的最大扭转角度约为 $11^\circ/\text{m}$,若超过自身允许的扭转角度,海缆缆体将会发生断裂、绝缘击穿、短路等可能,此时海缆处于严重状态;随着海缆扭转角度继续增加,铜导体应力也开始达到屈服应力值,此时其扭转角度为 3.48° ($17.4^\circ/\text{m}$),铜导体结构开始受到损害,进一步影响海缆的输电性能,认为铜导体开始发生屈服时的海缆处于非常严重状态。

综上所述,铜导体应力、XLPE绝缘层应力、铝合金护套应力、铠装层应力以及扭转角度可以体现出各层结构材料损伤的状况,能够对海缆健康状况作出一定的预估,所以本文选用上述指标为关键参量指标。

3 参量体系制定

通过提取能够充分反映海缆扭转行为的关键参量,并分析各参量的变化和时空分布规律,建立了能够全面表征海缆扭转损伤的力学参量体系,结果如表2所示。

表2 海缆各参量指标的预警报警及分布规律

Tab.2 Warning alarm and distribution rule of each parameter index of submarine cable

项目	预警	报警	严重	非常严重	扭转	
					时间	空间
铜导体应力/MPa	60% 屈服应力值 186	弹性极限 270	屈服应力值 310	强度极限 480	1.线性增加; 2.达到屈服后,以小于弹性阶段斜率线性增加。	海缆轴向上各节点应力变化趋势一致,且变化较为平稳
铠装层应力/MPa	60% 屈服应力值 410	弹性极限 600	屈服应力值 690	强度极限 1 040		
铝合金护套应力/MPa	60% 屈服应力值 8.7	弹性极限 10.0	屈服应力值 14.7	强度极限 27.0		
XLPE绝缘层应力/MPa	60% 屈服应力值 20	弹性极限 31	屈服应力值 34	强度极限 35		
扭转角度/(°/m)	60% 屈服应力值 1.8	初次发生屈服 3	自身允许最大扭转角度 11	第二次发生屈服 17.4	扭转速度越快,各层应力随时间增长速度越快,越早进入塑性阶段。	

当海缆各关键参量发生变化时,海缆整体会发生不同程度的变化。扭转初期,缆体不会受到严重损伤,但这个阶段时间较短,若任其发展,海缆各层结构材料将会在短时间内发生严重变形,影响其正常运行,此时即为预警报警阶段,也为工人进行抢修预留了足够的时间。随着扭转程度的加剧,铝合金护套第一时间达到其屈服应力值(即达到严重状态),随之出现明显形变,由于铝合金材料的特殊性

能,若扭转速度较慢或者扭转角度在可承受范围内,其产生的变形可能会恢复到原始状态;但若扭转持续进行,可能会导致开裂现象的发生,此时海水便会有进入海缆的风险,进而影响绝缘层正常运行。随扭转角度继续增加,铜导体、铠装层、绝缘层也会随之受到扭转的压力产生明显变形,并由预警报警阶段进入严重阶段,此时将会导致铜导体断裂、绝缘层产生放电、铠装层受到严重损伤等一系

列现象的发生,进而严重破坏海缆缆体的正常健康状态。

在海缆实际使用中,可根据实际情况和监测需求,确定参量的优先级,建议根据以下两个原则进行:①根据海缆各层结构的功能确定优先级。绝缘层的功能是隔离导体与海水,其一旦被破坏,将直接导致短路故障,重要性最高;导体主要用于承载电流,其圆整度会影响绝缘,重要性较高;铠装层能够为海缆提供机械保护和张力稳定性,防止渔具和锚具带来的外部威胁,重要性次之;铝合金护套主要用于阻挡外部海水的入侵,一般故障率较低。因此,可将各关键参量的优先级排序为:XLPE绝缘层应力、铜导体应力、铠装层应力、铝合金护套应力、扭转角度。②根据故障发生时参量变化的先后顺序确定优先级。由图4可知,铝合金护套最先发生屈服,随后依次为铜导体、铠装层、XLPE绝缘层。另外,在达到海缆自身允许的最大扭转角度之前,铝合金护套已经达到了屈服应力值,其他层没有发生屈服,所以将扭转角度参量放于铝合金护套应力和铜导体应力之间,最后得到的优先级排序为:铝合金护套应力、扭转角度、铜导体应力、铠装层应力、XLPE绝缘层应力。实际工程中,可根据具体情况选择一种原则,或者综合考虑两个原则。

综上,关于海缆的扭转行为力学参量体系的建立,能更直观地预测海缆发生扭转行为时各参量的变化状态,更准确地判断海缆的损伤程度。

4 参量体系验证测试

针对上述建立的关于海缆扭转损伤的力学参量体系,通过分析扭转速度为 $12^\circ/\text{s}$ 的海缆扭转模型对其正确性进行验证。

提取所建海缆扭转模型的相应数据,并绘制其各层应力-时间曲线,结果如图8所示。从图8可以看出:①各参量值小于等于报警阈值时,铜导体、XLPE绝缘层、铝合金护套、铠装层处于弹性应变阶段,其应力在这一时间段变化较快,且呈线性增长的趋势,并与上述总结规律保持一致;此时海缆扭转角度最大约为 $2.1^\circ/\text{m}$,在该参量阈值范围内,故海缆处于预警报警阶段,与表2内容相符。②当海缆发生扭转时间为0.05、0.30、0.65、1.65 s时,铝合金护套、铜导体、铠装层、XLPE绝缘层分别开始达到屈服应力值;当海缆第一次发生屈服时(即铝合金护套达到屈服),缆体扭转角度为 $3^\circ/\text{m}$;第二次发生屈服时(即阻水铜导体发生屈服),海缆扭转角度增加到 $18^\circ/\text{m}$,此时海缆到达严重状态,甚至达到非常严

重状态,这也与上文建立的力学参量体系内容相吻合。③海缆各层结构应力达到屈服强度极限后,缆体发生明显形变,各层结构将受到不可逆转的严重损伤,海缆将处于损伤非常严重状态。

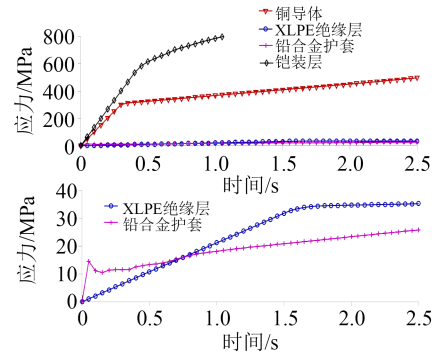
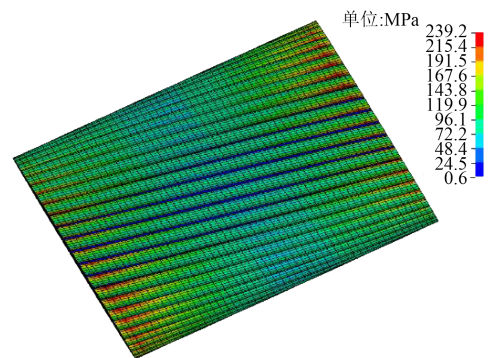


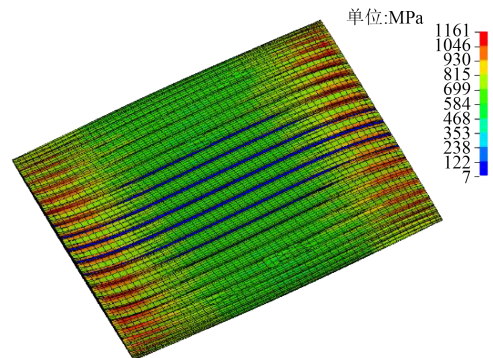
图8 海缆各层结构应力随时间变化曲线

Fig.8 Stress curves of each layer structure of submarine cable with time

图9是扭转速度为 $12^\circ/\text{s}$ 时不同扭转时间下的应力分布云图。从图9可以看出,在扭转初期时,海缆缆体产生的最大应力约为239 MPa,海缆外部结构可以起到一定的保护作用,海缆发生轻微形变;在处于非常严重状态下,海缆缆体产生的最大应力约为1161 MPa,远大于海缆各层结构的屈服强度极限,此时海缆缆体将受到严重损伤,从而导致铜



(a)海缆扭转初期



(b)海缆非常严重状态

图9 海缆应力云图对比

Fig.9 Comparison on stress nephogram of submarine cable

导体断裂、绝缘层产生放电、铠装层受到严重损伤等一系列现象的发生。

5 结论

(1)海缆发生扭转初期,其轴向各结构应力分布较为均匀;随着扭转角度的增加,海缆各结构应力增大,各结构材料特性受到损害,缆体轴向应力分布会出现波动。

(2)单一参量不能为海缆扭转损伤的诊断评判提供有效信息,本文提取出能够充分体现海缆扭转损伤的5个关键参量,每一参量指标对应不同扭转程度所选取的阈值不同,能够对海缆健康状态进行更为全面的描述,也能够对故障进行及时地预警。

参考文献:

- [1] 林晓波,卢志飞,甘纯,等. 光纤复合海底电缆扭转的有限元建模[J]. 光通信研究,2016(3):33-36.
- [2] 郭健,王博士,李鹏,等. 复合海底电缆顺-逆扭转特性对比研究[J]. 光通信研究,2022(2):22-26,78.
- [3] 肖世杰,胡列翔,周自强,等. 交联聚乙烯绝缘海底电缆应用及试验监测技术评述[J]. 绝缘材料,2018,51(1):1-9.
- [4] 胡志伟. 海缆电气和机械故障对光纤温度/应变影响的建模分析和特征提取[D]. 保定:华北电力大学,2019.
- [5] 张洪亮,肖晋宇,侯金鸣,等. 提高XLPE高压直流海缆经济性的研究展望[J]. 绝缘材料,2021,54(3):1-9.
- [6] 朱凤杰. 海底电缆运行状态监测技术研究[D]. 厦门:厦门理工学院,2017.
- [7] 唐中建,秦效智. 海底交联聚乙烯电力电缆敷设故障的分析[J]. 电线电缆,2000(1):42-46.
- [8] SAVANT R D, GAJJAL S, PATIL V G. Review on disc brake squeal[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology,2014,9(12):605-608.
- [9] 陈永,尹成群,吕安强,等. 光纤复合海底电缆故障检测与诊断方法[J]. 光通信研究,2014(3):56-59.
- [10] 肖伊,李庆民. 基于多特征参量的油纸绝缘老化状态定量表征方法[J]. 绝缘材料,2019,52(8):54-59.
- [11] WANG W, YAN X, LI S, et al. Failure of submarine cables used in high-voltage power transmission: Characteristics, mechanisms, key issues and prospects[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2021,15(9):1387-1402.
- [12] 杨志,柳小花,鞠森. 利用有限元法分析单芯光纤复合海缆扭转与光纤应变的关系[J]. 电测与仪表,2016,53(23):72-77.
- [13] 柳小花. 光纤复合海底电缆扭转与磨损特性的有限元分析[D]. 保定:华北电力大学,2017.
- [14] 胡玉娇. 光纤复合海底电缆机械行为的有限元模型研究[D]. 保定:华北电力大学,2018.
- [15] 李鹏,王博士,郭健,等. 基于有限元仿真的三芯光纤复合海缆扭转研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2022,43(4):67-73.
- [16] 卢正通,乐彦杰,吴颖君,等. $\pm 500\text{kV}$ 直流海底电缆机械性能分析与计算[J]. 电气技术与经济,2019(6):8-13.
- [17] 王泽鹏,胡仁喜,康士廷,等. ANSYS13.0/IS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [18] 刘智谦,高震,郝建,等. 交流500kV交联聚乙烯海缆绝缘材料的步进工频击穿特性及寿命模型[J]. 绝缘材料,2020,53(2):29-35.
- [19] 潘文林,梅文杰. 影响525 kV挤包绝缘柔性直流海缆绝缘击穿的制造工艺因素探讨[J]. 绝缘材料,2018,51(10):62-66.

收稿日期:2023-01-02;修回日期:2023-03-11。

作者简介:吕安强(1979-),男(汉族),河北任丘人,副教授,博士,主要从事分布式光纤传感及新型电力系统状态智能感知技术的研究;李婷(1998-),女(汉族),河北保定人,硕士生,主要从事海底电缆力学特性的分析研究。