

基于多种桩型的海缆保护系统研究

邓俊儒[✉], 张青云

(普拉思工业技术(江苏)有限公司, 徐州 221300)

摘要: [目的] 为了对海缆保护系统的设计和性能提供较为可行的建议。[方法] 分析了海缆保护系统各部件的力学性能、耐腐蚀性能、结构设计等, 并研究了这些性能的合适范围, 给出了计算模型。从风机基础、材料组成、微观结构、成本控制、失效原因等角度, 并结合美国API标准及国内外研究, 分析了J型管、I型管、单桩穿海缆三种主流形式及各部件如中心夹具、弯曲限制器、弯曲加强筋、固定装置等。[结果] 研究表明: 中心夹具的抗脱拉强度应大于35 kN, 弯曲限制器材料的抗拉强度大于45 MPa。[结论] 若部件的材料性能达标、结构设计合理、可减少不同部件在施工和服役期间的失效频率。所分析的设计和性能要求是较为合理有效的, 可为海缆保护厂商的研发和实际生产提供合理建议。

关键词: 海上风电; 海缆保护系统; I/J型密封管; 弯曲限制器; 弯曲加强筋

中图分类号: TK83; TM614

文献标志码:

文章编号: 2095-8676(2020)02-0091-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Several Subsea Cable Protection Systems Based on Different Foundations

DENG Junru[✉], ZHANG Qingyun

(Plus Industry (Jiangsu) Co., Ltd., Xuzhou 221300, China)

Abstract: [Introduction] In order to provide some feasible references for the designs and properties of subsea cable protection systems. [Method] This paper analyzed the mechanical properties, corrosion resistance and structural design of various components of subsea cable protection systems, and proposed the appropriate range of these values by calculations and models. Three mainstream forms of subsea cable protection systems and their components like centralizer, bending restrictor, bending stiffener and fixing device were analyzed from the perspectives of offshore foundations, material compositions, microstructures, cost control, and failure reasons, which also combined with American API standards and global researches. [Result] The results of the study show that the pulling resistance of the centralizer should be greater than 35 kN, and the tensile strength of the material for bend restrictors should be greater than 45 MPa. [Conclusion] If the material properties and structural designs of the components meet these references, the failure frequency of these components can be reduced during installation and service. This paper suggests that the references for designs and properties are feasible, which can provide reasonable suggestions for research and production of submarine cable protection manufacturers.

Key words: offshore wind; subsea cable protection system; I/J-tube seals; bend restrictors; bend stiffeners

0 前言

《2019年世界能源蓝皮书》的预测表明, 全球发电量将会以2%速度增长至2050年的47.9万亿度, 亚太地区将成为电力总需求增量最大的区

域^[1]。随着我国电力需求的增加和高石化能源占比结构, 全球环境和气候等问题日益凸显。2016年《巴黎协定》提出可持续发展及低碳绿色发展的目标, 倡导所有成员国并呼吁国际社会发力改善能源结构、发展高效清洁可再生能源; 旨在降低逐渐稳步增长的GHG温室气体排放量。根据IRENA数据预测显示, 到2050年全球可再生能源发电占比可达

到80%，其中太阳能和风能发电量占总发电量的比重52%^[2]。

中国积极响应全球能源的可持续发展理念，2015年开始，大力推动风电产业发展，至2017年，全年新装机总容量达到19.66 GW，居全球首位。我国优质风能资源主要集中在广东、福建、浙江、江苏、山东，高负荷用电区域集中在东部沿海省份，海上风电场的距离优势将有效地降低电力输送损耗。由于我国海上风电的发展处于初期阶段，随着整个产业链的协同作用，市场需建立一套效率高、技术可靠、运维成本低的体系，海缆保护系统的存在将有效降低海上风电场的运维成本。

海上风电场的电力输送系统依赖海缆在海底的复杂布局，由于海底沉积物的运动、底部洋流、碎屑流、潜在海底滑坡和地震以及渔业捕捞，使海缆过度弯曲、摩擦、疲劳甚至损坏。对于桩桶附近的海缆，风机桩桶的存在改变了局部范围洋流的流动，导致水流紊乱并在桩桶周围形成漩涡体系最终形成冲刷坑，导致J型管附近的电缆悬空。洋流的外力作用在与管桩接触的电缆处，电缆随着洋流来

回运动并与管壁摩擦造成电缆疲劳损坏^[3]。

1 影响海缆保护设计的风机基础

海底电缆保护系统的配套设计与海上风机基础的形式密切相关，而风机基础又受海底的地质结构、离岸距离、海水深度、海水活动的影响，并综合考虑风电场的经济效益。固定式和浮式基础是海上风电的两大主要类型，图1为各种细分固定式和浮式基础，随着水深变深，风机基础由重力式到单桩、导管架，最后到浮式基础的适用情形。根据表1各种基础形式的特点对比，再结合我国各个海域的地质条件综合决定基础形式。由于我国渤海水深较浅，黄河入海所沉积的大量淤泥和粘土，大部分海域有明显的冲刷现象，这种地质结构适合单桩和多桩基础。东海多为淤泥地质结构且近海水深多为5~10 m，桩基及导管架结构适用于该地形结构。南海北部湾和琼州海峡海底覆盖了细沙及淤泥，同时泥沙在海底的迁移运动较强，南海的海洋环境恶劣，水深较深这种地形不适合重力式基础，单桩或多桩是更好的选择^[4]。

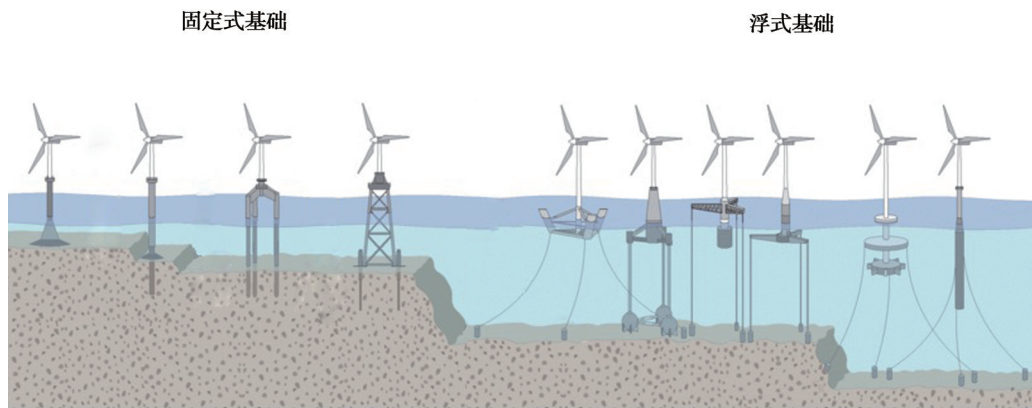


图1 各种海上风机基础

Fig. 1 Various offshore turbine foundations

2 海缆保护系统

国内外企业海缆保护产品的种类繁多，材料的采用也不尽相同。但不同的材料都应满足整体结构的力学强度、防腐蚀性能、抗疲劳性能，在满足性能的同时还应保证对环境无害。根据风机基础、海底地质条件、施工技术等衍生出三种主流形式。第一种：J型喇叭口形式如图2所示，带有密封圈的

中心夹具后段衔接弯曲限制器，适用于多桩和导管架基础；第二种：如图3所示为无转弯形式的I型喇叭口，该喇叭导管长度可根据风机基础决定，主要应用在导管架、多桩、浮式基础，这种结构的海缆保护主要由I型固定装置、加强筋、弯曲限制器组成。第三种：如图4所示，主要由加强筋、固定装置、弯曲限制器组成，该结构适用于单桩基础。

表 1 各种海上风机基础结构及特点比较^[5]Tab. 1 Structures and characteristics of various offshore wind turbine foundations^[5]

基础类型	结构特性	优缺点	造价成本	施工	适用水深
重力式	有钢质沉降和混凝土两种类型	结构简单;需对海床预处理,需要重型起重设备	较低	海床预处理后再大型起吊船施工	<10 m
多桩	上部承台	适用于多种地质条件;建造成本高	高	蒸汽或液压打桩锤	20~50 m
单桩	单桩钻孔钢结构	安装施工简单,无需海床准备;不适合岩石海床	高	液压打桩锤或钻孔安装	10~40 m
导管架	网格或三角结构	强度高,地质条件要求低;结构复杂,受海浪作用容易疲劳	较高	陆上把框架拼好,漂运,打桩	40~50 m
悬浮式	分驳船式、半潜式、单立柱式、张力腿式等	系泊锚固系统设计难度大	很高	陆上完成机组安装,拖运系泊起浮、拖航、现场系泊	>50 m



图 2 J型密封中心夹具

Fig. 2 J-tube seal

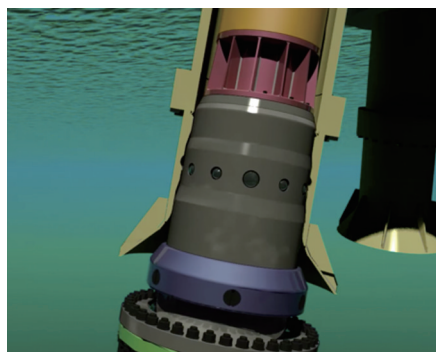


图 3 I型管海缆保护系统

Fig. 3 I-tube subsea cable protection

2.1 J型管中心夹具

典型的中心夹具如图 2 所示,整体采用哈呖式结构和锥形导向头设计,便于进入 J 型管。中心夹具最重要的作用之一是实现海缆在 J 型管内的中心定位,防止海缆在外力的作用下管内的摆动,从而减少与管壁长期摩擦碰撞造成的疲劳损伤。夹具内表面衬弹性高分子垫以提高夹具与海缆的摩擦系数和紧合度,建议两者的抗拉脱力不小于 35 kN。Philippe 等的实验结果表明,海缆保护系统所受的



图 4 单桩穿海缆固定装置型海缆保护

Fig. 4 Subsea cable protection for monopile foundations

最大应力点位于 J 型管的中心夹具处,该实验测试了六大海上风电场从水深 9.8~27.8 m、浪高 4.1~15.1 m、浪的持续时间 7.0~14.2 s 以及洋流速度在 1.14~1.60 m/s 的条件下,对海缆保护系统的最大剪切应力 15.61 kN,轴向最大应力为 11.58 kN,最大弯曲应力为 12.35 kN^[6]。由于聚氨酯材料长时间受应力的蠕变效应,使得应许抗拉强度取名义的 45%,故中心夹具的抗脱拉强度应大于 35 kN。

图 2 中的红色密封圈是中心夹具最重要的配套零件,一般采用锥型或 D 型的结构设计,材料采用微弹性高分子材料。美国石油局 API 手册建议中心夹具上使用 4 层密封圈,且密封圈的外径比喇叭口的内径多出 2~4 mm,保证夹具与 I/J 型管之间的弹性接触并达到密封的防腐效果,同时能阻止海底生物进入及附着在 I/J 型管。密封圈应保证喇叭口内外保持一定的压力差,并且所使用的材料在应力作用下不容易产生蠕变。材料还需保证低吸水性,不产生水解。密封圈材料应保证在海底下低的老化性能,在热胀和冷缩过程中保持良好的密封性能。

中心夹具在施工或服役期间可能出现一些问题,如在施工 Pull-in 时,中心夹具与海缆之间产生滑动,则可能导致 J 型管不能起到密封的作用,原因可能为 Pull-in 的拉力过大,中心夹具与海缆的抗脱拉力太小。还有如中心夹具不能顺利地 Pull-in,可能因为施工的绞盘拉力过小,中心夹具或密封圈的外径过大等原因。最常见的问题多为密封圈不能起到密封作用,主要原因有如喇叭口内外的压力差过大,导致密封失效;过多的热循环次数,导致密封圈老化程度过快;密封圈的外径尺寸设计过小以及施工绞盘拉力不够,还未形成良好的密封效果。

对于中心夹具与海缆产生滑动的问题,需重新计算 Pull-in 的拉力,防止拉力过大将中心夹具拉脱,也可能是因为中心夹具与海缆的抗脱拉力太小,则需要重新设计和测试该性能。若中心夹具不能顺利完成 Pull-in 安装,建议重新检查和设计中心夹具及密封圈的尺寸,或评估施工绞盘的拉力是否太小。若中心夹具的密封圈不能起到密封效果或脱落,则需重新检查密封圈的尺寸,或者检查绞盘的拉力是否太小未能将中心夹具的密封圈形成喇叭口内外压力差的密封效应,也可能需要重新拧紧将中心夹具与密封圈固定的螺栓。对于密封圈疲劳老化过快而导致密封失效,则需重新评估材料适用环境并选择一种更适合的密封原材料。

2.2 I型管的固定装置

导管架的 I 型管多为无转弯的直线方向,可应用于多桩、浮式、导管架基础。多桩或导管架基础的导管口离海床高度可达 7~8 m,浮式基础导管口离海床大于 50 m,这种 I 型管可省去大量 J 型管的钢质用材。由于导管口离海床的距离过大,需要有固定装置将海缆保护系统固定在桩基础上以减少其作用在海缆上的负载。典型的 I 型管固定装置如图 3 所示,该结构利用滚珠与配套的喇叭口凹槽结合,将海缆保护固定在喇叭口上。固定装置的材料多为金属,金属材料在低温状态下的蠕变效应不明显,滚珠的涂层需具有好的耐磨性能。材质为钢结构应考虑其在海底的单面腐蚀裕量,可参照 JTS 153—2015 水运工程结构耐久性设计标准计算^[7]:

$$\Delta\delta = K[(1-P)t_1 + (t-t_1)] \quad (1)$$

式中: $\Delta\delta$ 为钢结构单面腐蚀裕量(mm); K 为钢结构单面平均腐蚀速度(mm/年),水位变动区或水下

区取 0.12,泥下区取 0.05; P 为保护效率(%),涂层、金属热喷涂及包覆有机复合层可取 50%~95%,阴极保护取 $\geq 90\%$; t_1 为防腐蚀措施的设计保护年限(年); t 为钢结构的设计使用年限(年)。

如上所述 Philippe 等的实验表明,洋流在轴向最大拉力为 11.58 kN^[6],则滚珠卡扣处承受的最小抗拉应力为 11.58 kN 与海缆保护系统在海底的自重之和。

2.3 单桩穿海缆的固定装置

该固定装置的设计适用于单桩结构,如图 4 所示为典型的形式,斜向上开 45°角的圆孔。其优点在于不再需要加装 J 型管喇叭口,结构更加简单可靠。由于喇叭口为钢质材料,在运输及施工安装海缆保护过程中,表面涂层经常被损坏,因此防腐性能下降。单桩结构的保护系统可以省去 J 型喇叭口的生产和安装成本,也可以解决喇叭口的腐蚀问题。由于海缆没有 J 型管的保护,需要在倒刺或滚珠结构的固定装置前加装弯曲加强筋,防止海缆于外部摩擦的疲劳损伤,尾部衔接弯曲限制器。同时由于这种类型的结构使得海缆能在保护系统中滑动,海缆与海水充分接触将更有利于海缆的散热。

抗拉应力会集中在倒刺或滚珠的卡扣上,同时钢结构材质低温应力下的蠕变效应不明显,则如上所述最坏情形下的单个卡扣抗拉应力应大于 16 kN。由于金属材料优异的力学性能,而抗腐蚀是金属材料的重点,可根据该装置的金属材质和腐蚀电流密度等计算牺牲阳极的用量。

整套组件在陆地上完成安装,施工时引线连接锥形牵引装置前行,倒刺或滚珠的固定装置穿过单桩的圆孔后,保护系统被固定在桶桩上。继续拉动引线,锥形牵引装置与海缆保护系统分离,海缆能在保护系统内继续前行。该装置在施工 Pull-in 阶段出现的问题较多,主要为不能顺利穿入单桩圆孔。可能的原因有:

- 1) 锥形牵引头的设计不合理,不能起到引导作用。
- 2) 锥形牵引装置与海缆保护系统分离的拉力阈值过低,导致其提前分离,固定装置未能顺利进入圆孔并卡住。
- 3) 海底由于洋流的运动,导致海缆的形态晃动,或拱形海缆下放设备不能使海缆形成良好的穿孔角度,未能利用好拱形海缆下放设备在海缆另一

端形成的推力。

4) 绞盘的拉力过小, 不能提供海缆保护装置穿孔所需的拉力。

对于上述等问题, 需要重新检查锥形牵引头的外形设计以及涂层的选择, 可设计成类似于子弹头的弧形锥形头有利于减小摩擦力或选择摩擦力更小的涂层。同时需重新检查牵引头与保护系统分离的拉力阈值, 防止阈值过低。若洋流的扰动导致海缆形态的晃动造成施工的困难, 需选择洋流较为温和的施工期窗口。同时适当增加施工绞盘的拉力, 重新模拟或设计海缆下放拱形设备的使用, 以更为合适的海缆形态和角度完成施工。

2.4 弯曲限制器

海缆弯曲限制器可防止海缆因洋流运动、渔业捕捞等外部受力造成的断裂或疲劳损坏。国内外主要分弯曲限制器类型按材料分为金属质和聚氨酯两种。金属弯曲限制器由于成本低, 力学性能优良等优点占据一定的市场, 但由于金属材料密度大, 其自重会增加海缆的重力负载; 金属材料在海底容易被腐蚀, 随着材料的腐蚀, 性能将大大降低, 并且更换成本较高。聚氨酯材料因其优异的抗腐蚀性能和耐磨性能, 同时其密度为 1.17 g/cm^3 左右, 与海水密度接近, 不会额外增加海缆的负载。弯曲限制器的应用不限于风机基础的行式, 在未来浮式基础的大趋势下, 弯曲限制器的应用也很广泛。根据海缆大小规格, 弯曲限制器的尺寸也不同。

图5为弯曲限制器结构原理, 在弯曲限制器达到最小锁合半径之前, 外部力矩主要传达至海缆, 达到锁合半径后, 额外的弯曲力矩由弯曲限制器承受^[8]。表2为典型弯曲限制器聚氨酯材料的性能参数, 聚氨酯材料在长期高应力状态下容易发生蠕变, 该材料的弯曲限制器的限弯能力将下降, 故聚氨酯材料弯曲限制器在短期受应力作用下的许用应力取材料强度的45%, 在长期高应力作用下, 许用应力取材料强度的15%。张聪在弯曲限制器的实验数据表明, 连续施加应力状态下, 弯曲限制器所受最大应力为 21.08 MPa ^[9], 若取45%的许用应力, 则建议弯曲限制器材料的抗拉强度大于 45 MPa 。

弯曲限制器的最小要求长度受多重因素影响, 如桩的类型与直径, 喇叭口或单桩孔离海床的高度, 洋流的冲刷深度等。故为了计算弯曲限制器最

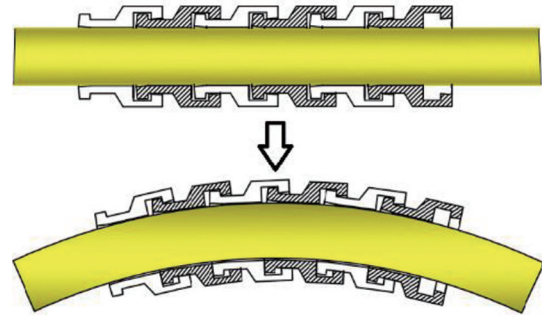


图5 弯曲限制器结构原理

Fig. 5 Principle of bend restrictors

表2 典型弯曲限制器材料性能指标

Tab. 2 Properties of typical material for bend restrictor

性能指标	测试结果
抗拉强度/MPa	≥ 45
弹性模量/MPa	≥ 1500
断裂伸长率/%	15~20
邵氏D硬度	83 ± 2
磨耗/ mm^3	60
密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.17

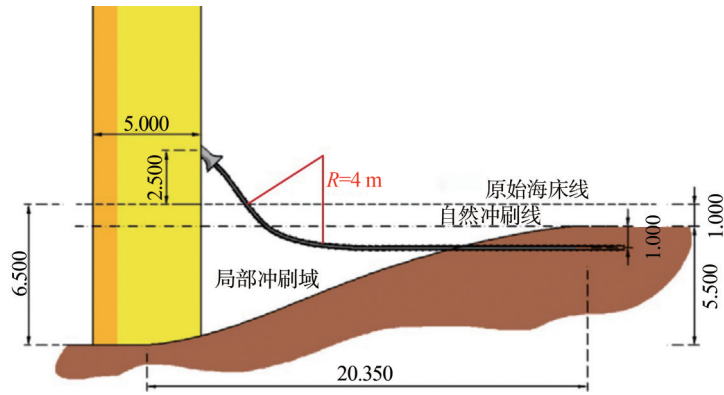
短的长度, 进行以下假设:

- 1) 图6模拟最严重冲刷程度导致海缆悬空的情景。
- 2) 单桩孔离原始海床高度 2.5 m , 桩的直径 D 为 5 m 。
- 3) 最严重冲刷时, 洋流自然冲刷深度为 1 m , 并且洋流冲刷为非线性。
- 4) 桩的存在导致局部冲刷深度为 $1.3 \times D = 6.5 \text{ m}$, 海缆掩埋深度为 2 m , 其他模拟数据如图6所示。

可根据假设的数据不同, 计算不同数据下弯曲限制器最短长度要求。弯曲限制器所需的最短长度的近似计算可分为三部分: 第一部分, 近似处理为从喇叭口到与原始海床线的交点且夹角为 45° 的直线; 第二部分, 与原始海床线交点到海缆变成水平的弧度段, 且弯曲限制器的锁合弯曲半径取 $R = 4 \text{ m}$; 第三部分, 近似水平悬空段的海缆, 计算过程如下:

1) 第一部分近似处理计算: $S_1 = 2.5 \times \sqrt{2} = 2.5 \times 1.41 = 3.54 \text{ m}$ (夹角 45° 的直线段)。

2) 第二部分近似处理计算: $S_2 = 2\pi R \times 0.125 = 2 \times 3.14 \times 4 \times 0.125 = 3.14 \text{ m}$ ($R = 4 \text{ m}$ 且夹角为 45° 的弧度段)。



注：图中尺寸单位为m。

图6 最严重桩基附近的冲刷情形^[12]

Fig. 6 Model setup for maximum load and worst case scenario in scour condition^[12]

3) 第三部分近似处理计算： $S_3 = \frac{20.35 \times 4.5}{5.5} - (2.5 + 2.5 + \frac{4}{\sqrt{2}}) = 8.82 \text{ m}$ (水平悬空段)。

则弯曲限制器总长度 $= S_1 + S_2 + S_3 = 3.54 + 3.14 + 8.82 = 15.5 \text{ m}$ ，为了保留安全边际，弯曲限制器的最短长度建议取 16 m。

2.5 弯曲加强筋

弯曲加强筋的应用广泛，可应用在单桩结构固定装置的前端，导管架和浮式基础的 I 型喇叭口后段，海床上海缆交叉部位等。加强筋可为海缆增加抗弯曲强度，防止海缆的磨损。加强筋的主要材料多为高性能聚氨酯，根据应用场景不同可与金属质材料相复合，图 7 为典型锥形弯曲加强筋。弯曲加强筋的典型材料为聚氨酯弹性体，该材料的应力应变曲线具有非线性，杨氏模量低，高的断裂伸长率等特点，如图 8 所示为该典型材料的应力应变曲线，该材料的杨氏模量随着应变的不同而不同，其断裂伸长率可达到 350%。加强筋失效的主要原因为材料因接触海水、阳光、高温、频繁受应力的老化和与其它配件衔接处的断裂。

Oliverira 的实验测试了该材料的弯曲加强筋在非老化和因接触海水而老化的材料结构变化，热稳定差异及力学性能的改变等^[10]。实验结果表明材料在老化后化学组成并未发生明显变化，但抗拉伸应力变大，主要原因是因为材料的老化促进了材料高分子链的交联反应。

有些加强筋的固定段会嵌入金属，金属螺栓将滚珠或倒刺等的固定装置固定，这种复合形式的加



图7 弯曲加强筋

Fig. 7 Bend stiffeners

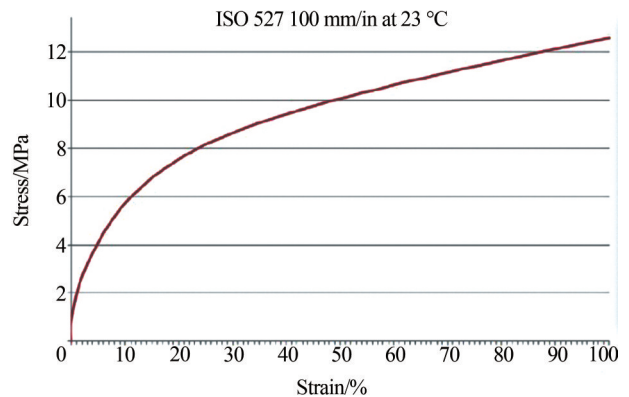


图8 典型的加强筋材料应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of typical material for bend stiffeners

筋应考虑金属的防腐。对于未含与金属材质复合的加强筋，如图 7 所示。由于洋流的运动，导致海缆不断将弯曲矩和剪切力传递给加强筋，美国石油局 API 手册表明最大应力将会传至未固定端处，故该段应做应力性能测试、疲劳和蠕变等测试，API 手册建议疲劳测试的频率为 0.1 Hz。

3 结论

本文研究了海缆保护系统的三大主流线路,分析了各种路线的优势和缺点。J型管的线路由于导管长,所需成本较高,喇叭口在运输和施工途中,涂层容易被损坏,导致防腐效果降低,同时存在中心夹具密封圈经常不能起到良好的密封效果等问题;虽然单桩穿海缆节省了较多的原料成本,但施工中往往不能顺利穿入桩孔。I型结构的固定装置结构较为复杂,滚珠的原材料需具备优异的耐磨性能,导致成本增加。这几种路线的优缺点较为明显,需要多方如设计院、制造商、施工方等结合工程实际状况确定路线。

参考文献:

- [1] SAHU B K. Wind energy developments and policies in China: a short review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(1): 1393-1405.
- [2] WANG D D, SUEYOSHI T. Climate change mitigation targets set by global firms: overview and implications for renewable energy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 386-398.
- [3] 王东良. 浅析海上风电海缆及海缆保护管冲刷设计及施工 [J]. *低碳技术*, 2017(23): 68-69.
WANG D L. Analysis on scour of design and installation of offshore wind cable and subsea cable protection tube [J]. *Low Carbon World*, 2017(23): 68-69.
- [4] 马爱斌, 江静华. 海上风电场防腐工程 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
MA A B, JIANG J H. Anticorrosion project for offshore wind farm [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2015.
- [5] 张成芹, 王俊杰, 刘玉霞. 海上风电单桩自动化移动式稳桩平台研究 [J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(增刊1): 3-8.
ZHANG C Q, WANG J J, LIU Y X. Research on monopile automatic mobile stabilizing platform for offshore wind power [J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35 (Supp. 1): 3-8.
- [6] THIES P R, JOHANNING L, BASHIR I, et al. Accelerated re-
- liability testing of articulated cable bend restrictor for offshore wind applications [J]. *International Journal of Marine Energy*, 2016, 16(1): 65-82.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for durability of port and waterway engineering structure: JTS 153—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [8] 李博, 李文博, 郭江艳, 等. 不同本构模型限弯器非线性力学分析 [J]. *石油机械*, 2019, 47(7): 48-53.
LI B, LI W B, GUO J Y, et al. Nonlinear mechanical analysis of benders with different constitutive models [J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(7): 48-53.
- [9] 张聪. 海上风电海缆弯曲保护装置设计技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
ZHANG C. Research on the design of bend restrictors for the subsea cable of offshore wind [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [10] OLIVEIRA G L D, GOMEZ A J A, CAIRE M, et al. Characterization of seawater and weather aged polyurethane elastomer for bend stiffeners [J]. *Polymer Testing*, 2017, 59 (1): 290-295.

作者简介:



邓俊儒

邓俊儒 (通信作者)

1992-, 男, 江西赣州人, 普拉思工业技术(江苏)有限公司材料工程师, 美国南加州大学材料工程专业硕士, 主要从事高分子材料研发测试 (e-mail) Junru.deng@yahoo.com。

张青云

1991-, 男, 陕西宝鸡人, 普拉思工业技术(江苏)有限公司材料工程师, 清华大学材料工程专业硕士, 主要从事高分子材料研发测试 (e-mail) zhangqy19@outlook.com。

(责任编辑 李辉)

