

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.038

强风化/全风化岩面海底电缆防护设计研究

高照普¹, 张晓斐², 罗朝发², 朱坤阳², 李方平¹

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250014; 2. 电投(青岛)投资发展有限公司, 山东 青岛 266034)

摘要:为减少海底电缆遭受不必要的损害,研究强风化和全风化岩面对海底电缆的影响及其防护措施。通过对比不同风化程度岩石的力学参数,计算电缆与岩石之间的法向接触压力、摩擦阻力、轴向应力和弯曲应力,并评估电缆的安全系数。研究结果表明:强风化和全风化岩面会导致电缆承受较大的应力和变形,尤其是在动态荷载下,电缆易发生塑性变形和疲劳损伤。为此,提出多种防护措施,包括海缆铠装、弹性海缆、套管保护、埋设设备改进、抛石保护和弯曲限制器等,有效增强了电缆的抗压、抗拉和抗弯曲能力,确保其在复杂地质环境中的长期稳定运行。

关键词:海缆防护;强风化;全风化;海缆特性

中图分类号:P756.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0201-06

Research on Protection Design of Submarine Cables for Highly and Completely Weathered Rock Surfaces

GAO Zhaopu¹, ZHANG Xiaofei², LUO Chaofa², ZHU Kunyang², LI Fangping¹

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250014, China;

2. Dian Tou (Qingdao) Investment and Development Co., Ltd., Qingdao 266034, China)

Abstract: To mitigate unnecessary damage to submarine cables, this study investigates the impacts of highly and completely weathered rock surfaces on submarine cables and proposes corresponding protective measures. By comparing the mechanical parameters of rocks with varying weathering degrees, the normal contact pressure, frictional resistance, axial stress, and bending stress between cables and rocks were calculated, and the safety factors of cables were evaluated. The research results demonstrate that highly and completely weathered rock surfaces subject cables to significant stress and deformation, particularly under dynamic loads, where plastic deformation and fatigue damage are prone to occur. To address these issues, multiple protective solutions are proposed, including improving of cable armoring, elastic cables, protective casing and burial equipment, rock dumping protection and bend restrictors, which effectively enhance the cables' compressive, tensile, and bending resistance and ensure their long-term stable operation in complex geological environments.

Keywords: submarine cable protection; strong weathering; fully weathered; submarine cable characteristics

0 引言

习近平总书记 2020 年在第七十五届联合国大会上首次提出“双碳”目标,“双碳”目标即二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和^[1]。为实现这一宏伟目标,电力系统逐渐转向以新能源为主体的新型电力系统。在这一背景下风电发展迅速,而海上风电作为风电的重要组成部分更是实现了井喷式发展。全球风能理事会(GWEC)发布的《2024 全球海上风电报告》指出 2023 年全球新增海上风电装机容量为 10.8 GW,相较于 2022 年增长 24%。中国连续六年成为全球海上风电新增装机量最多的国

家,2023 年新增装机 6.3 GW,累计装机容量达到 38 GW,占全球累计装机容量的 50%^[2-3]。海底电缆(以下简称“海缆”)作为海上风电电力传输的主要通道,其重要性日益彰显。据了解,海缆约占海上风电总投资的 10%。目前全球约有 140 万公里海缆,可绕地球 35 圈。如此大量的海缆分布在世界各海域,不免受到损害。自然损害如地震、海啸、岩石磨损等;偶然如船锚、渔捞所造成的损害;此外,不乏存在许多针对海缆的蓄意破坏事件。因此,必须要对海缆进行多方位的防护^[4-6]。

强风化及全风化岩海床面海缆的敷设施工和海缆防护目前国内实施较少,在南方海域海上风电海缆敷设施工时遇到强风化、全风化岩的情况

基金项目:山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2024TSGC1126);山东电力工程咨询有限公司科技项目(37-K2024-237)

第一作者简介:高照普(1984—),男,山东枣庄人,高级工程师,本科,研究方向为海水风电施工技术管理,yudong.ye@qq.com。

较多。岩石风化后结构松散、渗透性高、强度低、表面凹凸不平,存在大量裂隙和孔洞等特点^[7-8]。这些特点使得海底电缆在铺设和运行过程中极易受到机械损伤、磨损和腐蚀,进而导致电缆绝缘层破损、导体断裂等故障,严重威胁通信和能源传输的安全性和稳定性。近年来,随着海上风电的快速发展,海底电缆的铺设规模不断扩大,强风化、全风化岩面海底电缆的防护问题日益突出。传统的海底电缆防护措施在强风化、全风化岩面环境下往往难以取得理想的效果。因此,开展针对强风化、全风化岩面海底电缆防护技术的研究具有重要的现实意义。通过对海上风电海域内强风化、全风化岩石条件下的海缆防护进行深入研究,旨在确保海缆的长期运行安全和有效的海底防护。

本文主要探讨了强风化和全风化岩面对海底电缆的影响及其防护策略。研究通过分析不同风化程度岩石的力学特性,结合理论公式计算电缆在风化岩地基下的应力分布,包括法向接触压力、摩擦阻力、轴向应力和弯曲应力,并评估电缆的安全性能^[9]。结果表明,强风化和全风化岩面因其低强度和高渗透性,容易导致电缆产生塑性变形、动态疲劳损伤、差异沉降等问题^[10-11]。为应对这些挑战,本文提出了多种防护措施:海缆铠装通过高强度材料增强电缆的抗磨损和抗挤压能力;弹性海缆利用其优异的抗形变性能缓解地质形变带来的应力累积;套管保护通过物理隔离减少外部机械损伤和腐蚀;通过在埋设犁前端安装的由液压系统驱动的切削机将海缆进一步埋深;海缆埋设通过深埋降低风化岩表面对电缆的直接危害;抛石保护通过石块覆盖削弱水流和风化岩的侵蚀作用;弯曲限制器则通过限制电缆弯曲半径防止应力集中导致的损伤。这些措施综合应用,可显著提升海底电缆在复杂地质环境中的安全性和耐久性。

1 强风化/全风化岩面对海缆特性影响

根据《GB50021—2023 岩石工程勘察规范》,按照风化程度,岩石可分为未风化、微风化、中等风化、强风化、全风化。不同风化程度对比如表1所示。

表1 不同风化程度对比表

风化等级	结构完整	矿物变化	抗压强度
未风化	完整	无变化	极高
微风化	裂隙发育	局部次生矿物	高
中等风化	破碎	部分矿物分解	中等
强风化	碎块状	大部分矿物分解	低
全风化	土状	仅残留稳定矿物	极低

由于强风化岩(碎块状,大部分矿物分解,抗压强度低)和全风化岩(土状,仅残留稳定矿物,抗压强度极低)具有低强度、高渗透性、各向异性的特点。其原生结构完全破坏,呈现出类似土体的松散堆积特征,颗粒间胶结作用基本丧失,孔隙率高达40%~60%,导致岩体在外部荷载作用下极易发生塑性变形。根据某海上风电场地质监测报告数据,海缆敷设3个月内,全风化岩地基可能产生5~15 mm的差异沉降。地基沉降数据如图1所示。这种动态变形过程会通过土-缆相互作用传递至电缆本体,造成海缆应力畸变、动态疲劳、界面滑移损伤^[12-13]。

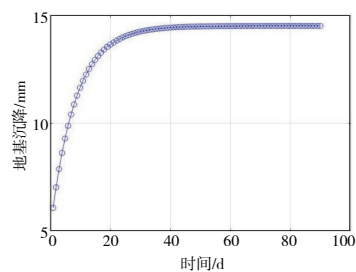


图1 海底电缆强风化岩地基沉降

为进一步探究由风化岩沉降引起的土-缆相互作用对电缆造成的损害,有必要对电缆与岩石之间的相互作用进行进一步的探究,强、全风化岩力学参数如表2所示。

表2 强、全风化岩力学参数

风化等级	抗压强度/ MPa	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$	弹性模量 E_r /MPa
强风化岩	15	1 050	20~30	50 200
全风化岩	<1	<10	15~20	1 050

电缆与岩石之间法向接触压力计算如式(1)所示:

$$\sigma_n = \frac{E_r}{1 - \nu_r^2} \cdot \delta \quad (1)$$

式中: E_r 为电缆弹性模量; ν_r 为岩石泊松比(强风化取0.25~0.35,全风化取0.35~0.45); δ 为电缆嵌入岩石深度,通过现场测量或有限元模拟获取。

电缆与岩石间的摩擦阻力计算如式(2)所示:

$$F_f = \mu \cdot \sigma_n \cdot A_c \quad (2)$$

式中: μ 为摩擦因数(强风化岩石取0.4~0.6,全风化岩石取0.3~0.5); $A_c = \pi DL$,为电缆与岩面接触面积(D 为电缆直径, L 为接触长度)。

由海洋运动、敷设张力等引起的轴向应力计

算如式(3)所示:

$$\sigma_{\text{axial}} = \frac{F_{\text{ext}}}{A} + \frac{F_{\text{f}}}{A} \quad (3)$$

式中: F_{ext} 为外部拉力(如洋流作用); A 为电缆横截面积。

因海床不平整或岩石局部塌陷导致的弯曲应力计算如式(4)所示:

$$\sigma_{\text{bend}} = \frac{M \cdot r}{I} = \frac{E_c \cdot D}{2R} \quad (4)$$

式中: M 为电缆截面弯矩; I 为电缆截面对中性轴的惯性矩(圆截面取 $\pi D^4/64$); r 为截面中性轴到最外气象的距离; R 为电缆弯曲半径(与岩石变形有关); E_c 为电缆弹性模量(如 XLPE 绝缘电缆取 1 030 GPa)。

总应力计算如式(5)所示

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{axial}}^2 + 3\sigma_{\text{shear}}^2} \quad (5)$$

式中 σ_{shear} 为切应力(由侧向荷载或扭转引起)。

根据上述公式,以强风化玄武岩为背景,输入一组合理参数,计算电缆所承受应力,如: $c = 30$ kPa; $\phi = 25^\circ$; $E_r = 150$ MPa; $\mu = 0.5$

得到计算结果为法向接触压力 $\sigma_n = 2.1$ MPa ($\delta = 0.01$ m); 摩擦力 $F_f = 0.5 \times 2.1 \times 10^6 \times 0.2 = 210$ kN; 总应力 $\sigma_{\text{total}} = 1.2$ MPa

由于海底电缆长期浸泡在腐蚀性海水中,承受波浪、洋流、岩石变形等多重动态荷载,对其安全性能提出了更高要求^[14]。如表 3 所示,海底电缆安全系数范围为 5.0~10.0。

表 3 典型领域的安全系数范围

应用场景	安全系数范围	说明
建筑结构(静载)	2.0~3.0	受规范严格约束
海底电缆(动态荷载)	5.0~10.0	高环境风险,需冗余设计
航天器件	1.5~2.0	轻量化要求,材料性能高度可靠

安全系数定义如式(6)所示:

$$\text{安全系数} = \frac{\text{材料的允许强度}}{\text{实际工作应力}} \quad (6)$$

安全系数大于 1,表示材料强度高于实际应力,结构安全;安全系数小于 1,表示材料可能发生破坏,需重新设计;安全系数等于 1,处于临界状态,不建议采用。

在强风化玄武岩电缆承受应力计算中,总应

力 $\sigma_{\text{total}} = 1.2$ MPa,若安全系数大于 5,则电缆材料的允许强度至少为 $\sigma_{\text{allow}} = 1.2 \text{ MPa} \times 5 = 6.0$ MPa。

计算结果表明应加强强风化岩面地质条件下的海缆强度。如将海缆铠装,外层安装套管。

根据上述公式,以全风化花岗岩为背景,输入一组合理参数,计算电缆变形程度。如:

$c = 5$ kPa, $\phi = 20^\circ$, $E_r = 20$ MPa, $\mu = 0.3$, $\delta = 0.05$ m, 弯曲半径 $R = 10$ m。

得到计算结果,弯曲应力 $\sigma_{\text{bend}} = 15$ MPa。

计算结果表明海底电缆承受着巨大的弯曲应力,弯曲应力过大通常造成海缆断裂。基于上述情况,有必要对海缆采取加装弯曲限制器、采用柔性套管等措施。

2 强风化/全风化岩面海缆防护

2.1 海缆铠装

海缆铠装是海底电缆的关键保护结构,旨在抵御复杂的海洋环境对电缆造成的机械损伤和环境侵蚀,其核心功能包括提供机械保护、增强抗拉强度、抵抗外部压力、防止腐蚀以及减少动态环境下的疲劳损伤。铠装层设计需综合考虑水深、环境条件、电缆类型及铺设方式等因素,以确保电缆在深海高压、强拉力和腐蚀性环境中长期稳定运行^[15-16]。目前海缆铠装主要采用 3 种材料:钢丝铠装、钢带铠装以及非金属铠装。不同铠装材料特性如表 4 所示。

表 4 不同铠装材料特性对比

特性	钢丝铠装	钢带铠装	非金属铠装
材料	高强度镀锌钢丝或非镀锌钢丝	镀锌钢带或不锈钢带	芳纶纤维、玻璃纤维等
抗拉强度	极高	中等	高
抗压能力	极高	较高	较低
抗疲劳性能	优异	良好	优异

针对风化程度较高的海床地质环境,优先选用具有高强度铠装层的海缆。例如钢丝铠装海缆,如图 2 所示。其铠装层能够增强海缆的抗磨损和抗挤压能力,有效抵御风化岩颗粒的摩擦以及岩石局部移动产生的压力^[17]。考虑经济成本等因素,亦可能同一条线路的不同路段选用不同的铠装材料^[18]。

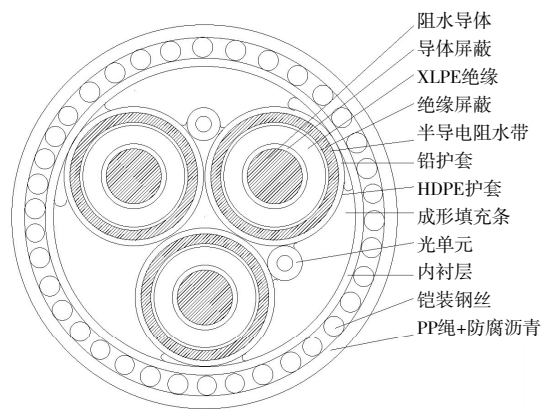


图2 海缆铠装示意图

2.2 弹性海缆

高弹性海底电缆因其优异的机械性能而备受青睐,这种电缆展现出卓越的抗形变能力和耐久特性,能够持续耐受多次弯折和拉伸作用,具有较长的服役寿命。在强风化带和全风化岩层等复杂地质环境中,此类电缆往往成为优选方案。其独特的结构设计使其能够有效应对岩体位移和差异沉降现象,显著缓解因地质形变引发的应力累积问题。以高分子绝缘电缆为例,其特有的弹性特征使电缆能够自主调节形态分布,从而大幅降低因外部应力导致的损伤概率。选用弹性海缆能有效提升海缆的抗弯曲能力,从而实现在强风化、全风化地质条件下海缆的有效防护。

2.3 套管保护

海底电缆套管保护是确保电缆在复杂海洋环境中长期安全运行的重要技术手段,通过物理隔离和强化结构设计,抵御外部机械损伤、腐蚀及生物侵蚀^[19]。随着海洋工程材料技术的持续迭代,套管材质体系历经多阶段技术演进,已形成基于差异化场景需求的多元化解决方案。如表5所示系统总结了不同材质套管的防护性能、适用场景、以及优缺点。如表6所示为不同材质套管经济性对比。

表5 不同材质套管特点

套管类型	防护性能	适用场景	优点	缺点
高密度聚乙烯(HDPE)套管	抗腐蚀、抗压、防水	浅海、低风险海域	成本低、耐腐蚀、易安装	抗冲击弱、不适合深海
金属套管	抗冲击、锚害、挤压	深海、渔捞区、锚泊区	强度高、抗外力损伤	质量大、成本高
复合套管	兼顾柔韧性、抗拉强度	浮式风电、油气平台	适应动态弯曲、抗疲劳	工艺复杂

表6 不同材质套管经济性对比

套管类型	成本/(万元/km)	预期寿命/年
HDPE 套管	20~30	15~20
金属套管	80~120	30~50
复合套管	50~70	25~35

基于不同材质套管特点与经济性分析,强风化、全风化海床地质首选金属套管。金属套管相较于HDPE、复合套管,虽然投资成本高,但抗压能力明显提升、使用寿命更长,大大减少了后续的更换维修。以铸铁套管为例,这种材料在电缆与基岩之间形成了可靠的物理隔离层。其特有的材料特性包括较高的屈服强度、优异的硬度指标和良好的耐磨性能,为电缆在整个服役期内的稳定运行提供了有力保障^[20]。

2.4 海缆埋设

强风化、全风化海床地质条件下,若直接将海缆放置于岩面,将不可避免产生5~15mm沉降,极大威胁海缆安全。在条件允许的情况下,尤其是强度较低的强风化、全风化岩面地质,尽可能将海缆深埋。将海缆埋入海底可以直接避免海浪运动、抛锚、渔捞等危害,是保护海缆最为简单、有效的方法^[21-22]。对于岩石类复杂海底地质环境,海缆埋设深度不应低于3.0m。

在风化岩地质中敷设海缆,开沟的精准度至关重要。如果开沟深度不够,海缆可能无法深埋到稳定地层,使得海缆更容易受到风化岩表面的磨损、海浪冲击和其他外力干扰。例如,当开沟深度仅达到浅表层风化岩时,由于这部分岩石风化程度高、结构疏松,海缆在后续的使用过程中,很容易因岩石的进一步风化剥落而暴露在外。相反,若开沟过深,可能会增加施工难度和成本,还可能破坏更深层相对稳定的地质结构,引发潜在的地质问题。如果沟壁坍塌,可能会直接挤压海缆,导致海缆变形甚至损坏。采用合理的开沟工艺,如采用水力喷射开沟方式,可以有效减少沟壁坍塌的风险。水流通过高压水泵到达喷嘴,经喷嘴的水流具有很高的速度,水力喷射开沟时,适当的水压和喷射角度可以使沟壁的岩石颗粒在水的作用下重新排列,形成相对稳定的沟壁结构^[23]。

海底电缆埋设在遇到强风化、全风化等复杂地质条件时,传统高压水射流埋设犁在硬质地层中效率低下,且能耗较高。能耗占比达总功率的35%~40%。例如,在硬质海床中,高压喷射仅能

破碎浅表土层,难以达到设计埋深要求。基于此,提出一种在海缆埋设犁前部增加由液压驱动切削机的优化方案。该方案将切削机安装于埋设犁前部机架,通过铰接结构与主犁体连接,避免干涉原有犁刀作业。传统高压水射流埋设犁与附加液压切削机的埋设犁性能指标对比如表7所示。

表7 埋设犁改进前后指标对比

指标	传统高压水射流	附加液压切削机
硬质地层埋深/m	≤ 1.5	≥ 2.5
能耗/(kWh/m)	120~150	80~100
作业效率/(m/h)	15~20	25~35

综合现有专利及工程实践,该方案在提升埋设效率、降低能耗方面具有显著优势,尤其适用于海上风电等硬质地层场景。

海缆敷设临近强风化、全风化岩段,减慢敷设速度,记录敷设5m左右时,潜水员下水检查埋设犁状态、测量沟深;技术人员根据检测结果进行评估,选取合适的敷设速度,并不定期进行检查对比。敷设过程,利用埋设犁声呐系统实时监控埋设犁距泥面高度,实时调整埋设犁与泥面间距;利用倾角、拉力传感器监控埋设犁犁体水下姿态,发现犁体倾角加大、拉力减少,微调埋设犁,使其姿态正常;利用压力传感器监控铰刀压力,压力大于安全值则降低敷设速度。

海缆敷埋中施工船根据DGPS导航定位而移动,路由偏差由锚艇顶潮流抛设定位锚来控制。埋设机与船舶之间的牵引钢丝绳上设有导缆笼,海缆敷埋入水角度控制在 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$,海缆全程从导缆笼内通过,降低了海缆施工中所受的张力,也防止施工中海缆打扭。

2.5 抛石保护

海底电缆敷设工程通常需经历沟槽开挖与回填作业流程,然而经扰动后的回填土层其力学性能较原状土显著降低,具体表现为抗剪强度折减及抗侵蚀能力减弱。研究表明在复杂海洋水动力环境下,单一回填工艺难以确保电缆系统长期稳定性。基于此,工程实践中普遍采用抛石覆盖复合防护措施。

抛石保护是一种工艺成熟的海缆保护方式,500kV海南联网工程海底电缆保护方案中就采用了抛石保护方案。抛石保护是指将符合要求大小的石块沉入海底,以达到对海缆保护的目的,常用于海床裸露段、悬空段。抛石保护很大程度上可以避免海浪侵袭、轮船抛锚等对海缆造成损害。

根据海底地基土质的种类,抛石保护方案分为明埋式、暗埋式和混合式三类^[24]。由于海缆采取预埋设,后抛石混合保护方案,因此宜采用明埋式抛石保护。明埋式抛石保护即在海缆上部抛石形成保护层,削弱水流与风化岩的直接接触,从而减少因风化岩对海缆造成的危害。

针对抛石精度差、覆盖均匀性不足技术问题,提出了定向抛石技术。海底电缆定向抛石防护工程是一项技术含量较高的系统工程,其施工过程主要包含两个关键环节:石材预处理和精准抛投作业。在石材规格选择方面,需要统筹考虑电缆防护需求和堆石体结构稳定性,通常采用分层防护方案:内层设置粒径为25~50mm的级配碎石作为过滤层,外层则采用50~200mm的混合块石构成防护层。该工艺的核心技术在于专用抛石管道的应用,该管道系统作为连接施工船舶与电缆上方的输送通道,相较于传统抛石方式具有定位准确、施工效率显著提升等技术优势。

2.6 弯曲限制器

高风化程度岩体因其显著易碎性及结构不稳定性,对海底电缆工程构成特殊地质风险。现有研究表明:在强风化至全风化海床地质条件下敷设的海底电缆,由于岩体力学性能劣化,易受外部荷载作用产生显著弯曲应力集中效应。当应力水平超出材料屈服强度阈值时,将引发海缆铠装层塑性变形甚至导体断裂事故。工程实践数据显示,此类地质环境中的海缆故障案例中67.8%与弯曲应力超限存在直接相关性。因此,基于断裂力学理论,通过加装弯曲限制器可有效分散应力集中区域。海底电缆弯曲限制器是一种用于保护海底电缆在安装、运行或维修过程中因过度弯曲而受损的关键装置,通过限制电缆的弯曲半径,避免超过其机械承受极限。

弯曲限制器多用于由海缆埋设出、入口处,工程上以应用于海床与海上平台连接处最为常见,如图4所示。通过合理设计和使用弯曲限制器,可显著提升海底电缆系统的可靠性,降低维护成本^[25]。

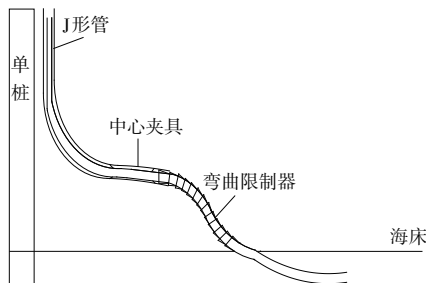


图4 弯曲限制器典型应用

3 结语

1) 本文依据 GB50021—2023《岩石工程勘察规范》将岩石按风化程度分为未风化、微风化、中等风化、强风化和全风化 5 种,并详细对比了各风化等级在结构完整性、矿物变化和抗压强度等方面的差异。强风化和全风化岩因结构破坏、矿物分解,从而表现出高渗透性和各向异性,易导致地基沉降和塑性变形。

2) 通过建立理论模型,本文计算了电缆在风化岩地基下的法向接触压力、摩擦阻力、轴向应力和弯曲应力,并结合安全系数评估了电缆的承载能力。结果表明强风化和全风化岩面下电缆承受的应力较大,安全系数需达到 5.0 以上以确保长期稳定运行。

3) 对风化岩地基的特殊性,提出了一系列防护措施:铠装设计采用高强度铠装层(如钢丝铠装)增强电缆的抗磨损和抗挤压能力;弹性电缆利用高弹性材料缓解地质形变带来的应力集中问题;套管保护通过金属套管等物理隔离手段减少外部机械损伤和腐蚀;埋设工艺优化,采用液压切削机等改进技术提高埋设效率、降低能耗;抛石保护通过定向抛石技术形成稳定保护层,削弱水流和风化岩的侵蚀作用;弯曲限制器通过限制电缆弯曲半径,防止应力集中导致的损伤。

参考文献:

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [2] 白旭. 海上风电的发展现状及关键技术[J]. 船舶工程, 2022, 44(2): 18-21.
- [3] 赵勇, 丁锐, 张静, 等. 海底电缆工程施工装备发展现状[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(增刊2): 173-179.
- [4] 晨阳, 马俊. 连接全球的海底光缆有多脆弱[N]. 环球时报, 2024-11-28(8).
- [5] DAVENPORT T M. the protection of submarine cables in Southeast Asia: the security gap and challenges and opportunities for regional cooperation [J]. Marine Policy, 2025, 171: 106435.
- [6] 田振亚, 朱嵘华, 张美阳, 等. 海上风电基础海底电缆动态特性分析[J]. 船舶工程, 2023, 45(1): 47-50.
- [7] 张翼宇, 黄志全, 赵菲, 等. 风化花岗岩矿物组成与渗透特性相关性研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 103-108.
- [8] 崔凯, 杨辉, 吴国鹏, 等. 贺兰口岩画载体岩石表层风

化壳损伤特征与机制研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(6): 1935-1950.

- [9] 李健华, 黄亚珏, 李争霖, 等. 基于 Fluent-OrcaFlex 联合数值模型的海上风电场海底电缆冲刷及应力状态研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 574-579.
- [10] 陈伟乐, 徐国平, 宋神友, 等. 风化岩遇水软化的强度试验及力学特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊1): 67-76.
- [11] 黄小卫, 冯宾, 傅明利, 等. 海底电缆动态疲劳试验方法研究[J]. 中国测试, 2024, 50(8): 79-85.
- [12] 向伏林, 杨天亮, 顾凯, 等. 钻孔全断面分布式光纤监测中光缆-土体变形协调性的离散元数值模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1743-1754.
- [13] 宋娜, 赵红艳, 李登科, 等. 岩石风化程度对土岩二元基坑变形的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11317-11326.
- [14] 宋光辉, 乔宇常, 陈凯. 海底电力电缆防腐涂覆用沥青材料的选用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2022(1): 13-16.
- [15] 王文超, 张建民, 赵国林, 等. 扁钢丝铠装光纤复合海缆拉伸试验与仿真分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3467-3473.
- [16] 陈果, 杨黎明, 方春华, 等. 深远海 35 kV 阵列海底电缆的阻水和铠装设计方法及试验研究[J]. 广东电力, 2021, 34(11): 95-104.
- [17] 陈大勇, 张慧蕊, 董小松, 等. 海底电缆抗拉性能数值分析[J]. 电线电缆, 2021(4): 19-22.
- [18] 郑琳, 吕东建, 周吉瑞, 等. 高压海底电缆铠装铜钢混合焊接关键技术研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2021(6): 24-26, 40.
- [19] 吴爱国, 袁舟龙, 公言强. 国内海底电缆深埋敷设施工技术综述[J]. 浙江电力, 2015, 34(3): 57-62.
- [20] 王裕霜. 500kV 海底电缆浅滩铸铁套管保护实践与思考[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 92-94.
- [21] 刘强, 程武伟, 雷芬丽. 海上风电场海缆的敷设方法和路由探测技术[J]. 造船技术, 2025, 53(1): 35-40.
- [22] 廖志鹏, 张立林, 江维臻, 等. 变电站二次控制电缆敷设机械化设备联动控制技术[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(3): 269-274.
- [23] 沈留阳. 水力冲射式海底挖沟机喷嘴喷射角优化分析[J]. 中国设备工程, 2019(11): 75-77.
- [24] 张涛, 范希评, 陈隽, 等. 海底电缆抛石保护层抗锚害性能研究[J]. 海洋湖沼通报, 2023(9): 1-13.
- [25] 徐海超, 阮建, 赵琳, 等. 海上风电工程弯曲限制器受力特性数值模拟研究[J]. 水力发电, 2022, 48(11): 115-118.

收稿日期: 2025-04-02