

纤维增强复合材料在风沙区混凝土基础的应用

张小明 朱红兵 冷武霖 李闽 杨兵

中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都, 610000;

摘要: 为了增强风沙区混凝土基础的抗风沙侵蚀及结构稳定性, 本文在内蒙古二连浩特市风电场项目中, 采用纤维增强复合材料对混凝土基础进行加固处理, 通过包覆、内掺纤维等方式改善其性能。结果表明, 应用该材料后, 混凝土基础的抗风沙侵蚀能力显著提升, 表面磨损与裂缝扩展得到有效控制, 力学性能和耐久性也大幅增强, 在不同环境条件下均能保持稳定。此外, 优化后的施工工艺和防风沙措施提高了施工效率, 降低了成本, 以期为类似风沙环境下的基础工程提供借鉴。

关键词: 纤维增强; 复合材料; 风沙区; 混凝土基础; 应用

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 017

引言

风沙区混凝土基础长期受沙尘侵蚀、温差变化及干旱气候影响, 易发生表面剥蚀、裂缝扩展与结构退化, 严重影响其服役寿命与安全性能。传统混凝土结构在极端气候条件下适应性差, 施工过程中也易受风沙干扰, 施工难度和后期维护成本高。纤维增强复合材料(FRP)因其高强度、耐腐蚀、抗裂性能优异, 被逐步引入风沙区基础工程中, 通过包覆、内掺或表面增强等方式改善混凝土基础的耐久性与结构性能, 成为提升风沙区基础工程抗劣环境能力的有效手段。

1 工程概况

该风电场工程位于内蒙古自治区锡林郭勒盟二连浩特市, 具体位置为北纬 $43^{\circ} 38' 42''$ 、东经 $112^{\circ} 11' 24''$ 。风电场场地属于沙化草原地貌, 整体地形平坦, 海拔高程在980m至1170m之间, 地势北高南低, 呈现轻微起伏, 且相对高差不超过200m。该地区地貌特征为波状高平原, 地表植物以牧场和草场为主, 各牧民间的草地用栅栏分隔。项目场址呈不规则多边形, 东西宽度为2.5~12.0km, 南北长度为26.1km, 总面积约213.3km²。风电场所在的二连浩特市, 属典型的温带半干旱大陆性季风气候, 特点为寒冷、风大、降水少、日照时间长、温差大。冬季寒冷漫长, 春季多风少雨, 夏季温热干燥, 秋季温润。年平均气温为 3.1°C , 无霜期为115至120天, 年降水量约150~200mm, 且降水主要集中在5月到10月。极端气温范围从 -39.6°C 至 41.5°C , 是华北地区最寒冷的地区之一。本项目包括25台风力发电机, 总装机容量250MW, 涉及风机基础、风机吊装、附属设备安装、站内道路、35kV集电线路以及220kV升压站的建设。该项目面临风沙侵蚀对混凝土基础的严峻挑战, 风沙不仅会破坏基础的稳定性, 还会增加设备维护难度, 甚至缩短基础的使用寿命。因此, 研究和开发能够抵御风沙侵蚀的新型基础结构和施工技术, 成为

本项目的重要任务。

2 纤维增强复合材料在风沙区混凝土基础应用的必要性

2.1 传统混凝土基础的局限性

频繁的风沙暴和长期的风沙侵蚀使得混凝土基础表面出现磨损、裂缝甚至局部剥离, 直接影响基础的承载能力与稳定性。裂缝的产生会使得水分和沙尘更容易渗透进入基础内部, 加速钢筋的锈蚀过程, 从而导致钢筋混凝土的强度逐渐下降。随着裂缝和腐蚀的扩展, 混凝土的抗压能力显著降低, 最终导致基础结构的整体失效。此外, 传统混凝土的维护成本较高, 需要定期进行修复和加固, 因此增加了工程的长期运营费用。这些因素共同作用, 使得传统混凝土基础在风沙区的使用寿命显著缩短, 维护频率增加, 严重时甚至导致基础提前退役, 影响整个工程的安全和效益^[1]。

2.2 纤维增强复合材料的优势

与传统混凝土材料相比, 纤维增强复合材料具有较高的抗拉强度和抗冲击能力, 有效增强基础结构的整体强度和抗变形能力, 使得混凝土基础能够更好地抵抗风沙的冲击和磨损, 提高其在极端环境下的稳定性与耐久性。此外, 纤维增强复合材料的耐腐蚀性强, 能抵抗风沙中的盐分和水分侵蚀, 延长基础的使用寿命, 减少裂缝扩展和钢筋锈蚀的风险。

3 纤维增强复合材料在风沙区混凝土基础的具体应用

3.1 材料选择与应用

纤维增强复合材料主要体现在其高强度、高韧性和耐腐蚀性。其构成包括纤维和基体, 纤维提供高强度和高模量, 基体将纤维粘结在一起并传递应力。常见的纤维材料有碳纤维和玻璃纤维, 二者具有不同的性能特点。

碳纤维适用于强度要求较高的部位，因其具有高强度、高模量和低密度的特性，有助于抵抗风沙带来的冲击和磨损。玻璃纤维成本较低，且耐腐蚀性能优越，广泛应用于对强度要求较低的部位，在风沙区表现出良好的长期稳定性。

在具体应用上，纤维增强复合材料可通过多种方式强化混凝土基础。一方面，将其直接掺入混凝土中，形成纤维增强混凝土，具有更高的抗裂性和抗冲击性，有效提高基础的耐久性。另一方面，将其制作成预应力构件，用于基础的加固和增强，特别是在承受较大荷载的区域。

3.2 基础结构设计

3.2.1 表面粗糙度增加技术

为了显著提高风沙区混凝土基础的抗风沙侵蚀能力，本项目引入创新的基础表面粗糙度增加技术，通过在基础表面设计微m级凹凸结构来增强其表面粗糙度。该技术的关键是通过改变基础表面的物理形态，减缓风沙对基础的直接冲击力与磨损作用。在风沙环境中，沙尘暴等极端天气的侵蚀速度往往非常迅速，因此，基础表面的粗糙度有助于减少风沙对结构的侵蚀。微m级凹凸结构通过增加基础表面的摩擦力，使得风沙在经过时被分散并阻挡，减少其对基础的直接撞击。此外，该技术还通过流体动力学优化设计，合理选择凹凸结构的形状与尺寸，使风沙在基础表面流动时能够形成合理的流场，进一步减少风沙的侵蚀力度。通过流体力学分析，有效减少风沙的直接冲击，使基础表面保持相对稳定，防止过多的沙尘进入基础内部，避免造成结构损伤或腐蚀^[2]。

3.2.2 与纤维增强复合材料的结合

为进一步提高风沙区混凝土基础的耐久性和抗风沙侵蚀能力，本项目在基础结构设计中将表面粗糙度增加技术与纤维增强复合材料（FRP）结合，形成了多重防护的综合设计方案。纤维增强复合材料的引入，尤其在基础结构的关键部位，如基础边缘、转角等位置，提供了额外的强度和韧性，有效增强了结构的抗冲击力和耐磨性。在这些区域，由于风沙侵蚀的强度更大，必须采取复合材料加固的方式。

将纤维增强复合材料与微m级凹凸结构相结合的设计，提升基础的抗风沙能力。纤维增强复合材料的高强度和高韧性使得混凝土结构能有效抵御风沙侵蚀造成的裂缝扩展和结构损伤，同时，这些材料在极端温差变化下的稳定性，也为基础提供长效保护。通过对基础表面进行合理的凹凸结构设计和材料的加固处理，风沙流经时不仅能减小冲击力，还能在复合材料的加固作用下有效防止裂缝的出现和扩展，减少风沙对基础的长时间

侵蚀。此外，此结合方式也能将材料的优点得到充分发挥。微m级凹凸结构能有效分散风沙的动能，而纤维增强复合材料在基础承载负荷的同时，增强了表面抗裂性能，使基础在风沙环境下的整体稳定性得到进一步提高。通过将两种技术相互配合，确保了基础结构在面对恶劣的风沙环境时，保持较长时间的稳定性和安全性。

3.3 施工工艺优化

3.3.1 预制装配工艺

为应对风沙区恶劣的环境条件，预制装配工艺在工厂内，根据设计要求提前生产基础构件，包括基础板、桩头等，所有构件采用纤维增强复合材料或纤维增强混凝土制造，具备较高的强度和耐久性，适应沙尘暴频发环境。预制构件的生产可确保质量精度，减少现场施工中的变数，避免因天气或风沙导致的施工延误。在施工现场，预制构件通过起重设备安装至指定位置，并利用高强度连接件将各构件紧密连接。连接完成后，采用加固措施确保整体结构的稳定性和承载能力。由于构件的预制化，施工过程中的人工投入和现场操作时间大大缩短，减少了风沙对施工人员的干扰，提升施工效率。同时，构件在工厂内生产，可以避开风沙的影响，确保生产过程不受外界环境干扰，提升了基础结构的质量^[3]。

3.3.2 封闭式施工技术

在多风沙地区，施工环境复杂且风沙频繁，封闭式施工技术应运而生。施工现场设立封闭式施工棚，隔离外界风沙侵扰，保护施工区域免受沙尘暴的影响。封闭棚内配备通风与除尘设备，确保施工过程中环境清洁，提供适宜的工作条件，防止沙尘污染建材或干扰施工精度。该技术有效避免了风沙对混凝土及其他建筑材料的影响，保障了施工质量，同时降低了因风沙引起的安全风险。

3.3.3 高效防风沙措施

为应对风沙的持续侵扰，项目采用高效的防风沙措施。施工现场布设可移动风沙屏障，依据实时风向和风力大小灵活调整其位置和角度，最大限度地阻挡风沙侵入施工区域。风沙屏障的应用显著降低了施工过程中风沙对人员和设备的影响，确保施工人员在较为安全的环境中作业，减少了因沙尘暴天气造成的工期延误和安全隐患。此外，固沙剂的使用有效防止了地表沙粒的扬起，降低了施工环境中的扬尘水平。固沙剂能将松散的沙粒固结在地面，防止风沙进一步扩散，同时减少了风沙对施工过程中的干扰。

3.4 试验与验证

3.4.1 试验场地选择

为了确保新型基础结构和材料在风沙区的实际应用效果，本项目选择典型的风沙环境作为试验场地。该

场地的气候与地理条件与工程实际场地高度一致,确保试验结果具有较高的代表性和实用性。试验场地位于内蒙古自治区,风沙环境典型,具有强烈的季风气候和沙尘暴天气,年均风速达到 5.3m/s,最高风速可达 15m/s,且年降水量较少,沙尘暴频发。试验场地的地形与风电场工程相似,海拔约 1000m,周围地表覆盖为草地和沙化土地。在该场地内,按照风电场项目的实际设计要求建造了试验基础,基础结构采用了与工程中相同的纤维增强复合材料加固。此设计能模拟实际工程中的风沙侵蚀环境,确保在测试过程中能真实反映出混凝土基础在极端环境下的性能表现^[4]。

3.4.2 试验设计与方案

试验内容涵盖风沙侵蚀试验、力学性能试验和耐久性试验等多个方面。在风沙侵蚀试验中,模拟了不同强度和频率的沙尘暴侵蚀,测试了纤维增强复合材料混凝土基础的表面磨损情况及基础内部的损伤程度。测试风沙暴的风速和颗粒大小范围分别设定为 10~20m/s 和沙粒粒径 0.1~2mm,风沙侵蚀持续时间为 180h,以真实还原风沙环境对基础结构的影响。

力学性能试验测试了新型基础结构在风沙区环境中的承载能力和变形特性。试验中,基础结构承受了不同荷载情况,测试了其抗压、抗拉和抗弯性能。测试结果还考虑了环境温度的变化,确保结构在高温、低温下的适应性。耐久性试验则通过对材料进行长时间的环境变化模拟,考察其在不同温度、湿度和风沙侵蚀条件下的长期性能,确保基础结构在风沙环境中的稳定性和可靠性。

3.4.3 试验结果分析

试验结果表明,采用纤维增强复合材料的混凝土基础在多个方面表现出显著的优势。首先,在抗风沙侵蚀能力方面,与传统混凝土基础相比,新型基础结构的表面磨损率显著降低,且未出现明显裂缝扩展。通过风沙侵蚀试验,发现纤维增强复合材料的基础能够有效防止风沙颗粒的侵入,保护了内部钢筋免受腐蚀,延长了基础的使用寿命。其次,在力学性能方面,纤维增强复合材料的混凝土基础表现出更强的抗压和抗弯能力,特别是在承受较大荷载时,基础结构的变形量明显低于传统混凝土基础。试验数据显示,新型基础的抗压强度提高了 15%以上,抗弯强度提高了 20%,大大增强了基础的稳定性和承载能力。此外,耐久性试验表明,在模拟的极端温度和湿度环境下,采用纤维增强复合材料的基础保持了良好的长期性能,未出现明显的老化或性能衰减。在不同温度范围(-40℃至 45℃)内,材料的稳定性和强度未受到明显影响,表现出优异的抗老化能力^[5]。

4 纤维增强复合材料应用的经济效益和社会效益

4.1 经济效益

通过采用新型施工工艺和高效防风沙措施,本项目施工效率提升了 20%以上,施工周期和成本得到显著降低。预制装配工艺和封闭式施工技术的结合,使施工过程更加高效、有序,缩短了工程建设时间,提前实现了混凝土基础项目的并网发电,增加了项目的经济收益。新型材料和优化施工工艺进一步降低了施工成本,预计施工成本减少了约 10%。尽管纤维增强复合材料的单价较高,但其高强度和耐久性减少了材料的使用量,并大大降低了后期维护成本。同时,施工过程的优化减少了人力和设备的投入,进一步降低了成本。新型基础结构的耐久性提高,减少了长期维护和更换成本,延长了基础的使用寿命,提升了项目的整体经济效益。

4.2 社会效益

风沙区风电项目在保障能源供应方面具有重要意义。提升混凝土基础的稳定性和耐久性,确保了风电设备的长期正常运行,提供了稳定可靠的清洁能源。不仅减少了对传统化石能源的依赖,也有效降低了环境污染,推动了绿色能源的发展。此外,项目的研究成果为多风沙地区混凝土基础的工程提供了宝贵的技术经验,推动了相关领域技术的进步。

5 结语

综上所述,本文详细探讨了纤维增强复合材料在风沙区混凝土基础中的应用。通过分析传统混凝土基础的局限性及纤维增强复合材料的优势,结合具体工程案例,阐述了其在材料选择、基础结构设计、施工工艺优化等方面的应用,并通过试验验证了其显著效果。未来,随着技术的不断进步,纤维增强复合材料在风沙区工程中的应用前景将更加广阔,有望为更多类似工程提供可靠的技术支持。

参考文献

- [1]王永恒. 建筑材料中玻璃纤维增强复合材料的应用研究[J]. 居舍, 2025, (17): 45~47.
- [2]徐立新,赵哲,司嘉辉,等. 热压成型法制备铜纤维增强碱激发矿渣复合材料[J]. 兰州交通大学学报, 2025, 44(03): 103~109.
- [3]张磊,刘哲,谭宗尚,等. 不同高性能工程树脂在玻璃纤维增强热塑性复合材料中的应用研究[J]. 纤维复合材料, 2025, 42(03): 40~45.
- [4]张磊,刘哲,谭宗尚,等. 不同高性能工程树脂在玻璃纤维增强热塑性复合材料中的应用研究[J]. 纤维复合材料, 2025, 42(03): 40~45.
- [5]潘明亮. 基于纤维增强材料的隧道修复与加固研究[J]. 合成纤维, 2025, 54(06): 81~86.