

海上风机导管架基础灌浆敏感性分析

张 威

华电科工股份有限公司 北京 100070

摘 要: 随着海上风电产业的蓬勃发展,海上风机建设规模日益扩大,对基础灌浆质量的要求也愈发严苛。本文聚焦海上风机导管架基础灌浆敏感性分析。先剖析灌浆系统核心参数,涵盖材料、构造、施工参数敏感性。接着探讨海洋环境因素,包括水文、气象、地质环境对灌浆效果的影响。随后介绍敏感性分析方法体系,涉及指标构建、模型建立及排序与权重确定。最后基于分析提出灌浆系统优化方向,涵盖材料性能、构造与施工工艺优化及质量保障措施,为海上风机灌浆提供参考。

关键词: 海上风机; 导管架基础灌浆; 敏感性分析; 优化方向

引言: 海上风电作为清洁能源重要部分,发展迅速。导管架基础灌浆是保障海上风机稳定运行的关键环节。灌浆质量受多种因素影响,不同因素对灌浆效果敏感性不同。准确把握这些敏感性,对优化灌浆系统设计、施工及保障风机长期稳定运行意义重大。

1 灌浆系统核心参数敏感性分析

1.1 灌浆材料关键性能参数敏感性

胶凝材料配比敏感性直接关联浆体核心性能。不同配比下浆体胶凝强度形成速率有差异,影响灌浆体与基体结合效果。配比偏差或致浆体结构均匀性下降,引发后期强度不足,相关试验表明,胶凝材料配比偏离设计值1个单位时,浆体早期强度降幅可达10兆帕^[1]。外加剂掺量敏感性体现在掺量变化对浆体工作性能的调控,过高或过低会打破浆体内部稳定状态,造成流动性异常或凝结特性偏离要求,当外加剂掺量超出设计值2千克每立方米时,浆体流动度会明显波动。浆体流动性敏感性关乎灌浆过程顺畅,流动性不足会使灌浆扩散受阻,无法充分填充5毫米以上间隙;流动性过强则可能引发浆液流失,影响密实度,减少灌浆体有效承载面积。浆体凝结时间敏感性影响施工衔接效率与灌浆质量,凝结过快易致灌浆未完成即初凝,形成直径超3厘米的局部空洞;凝结过慢则可能延长施工周期至24小时以上,增加外界干扰风险。浆体强度发展特性敏感性决定灌浆体长期承载能力,强度发展速率与设计预期不符合会导致承载时序错位,若7天强度未达设计标准要求值,会直接影响整体结构稳定性。浆体体积稳定性敏感性涉及灌浆体硬化后的体积变化,体积变形超出允许范围1毫米每米时会产生内部应力,破坏与周边结构的结合状态。

1.2 灌浆构造参数敏感性

灌浆构造参数对灌浆效果影响显著,合理设置这些

参数至关重要。灌浆间隙尺寸敏感性影响浆液扩散范围与填充密实度,间隙超过20毫米可能导致浆体用量增加且不易形成均匀结构;间隙小于5毫米会限制浆液流动,造成填充不充分。灌浆孔布置方式敏感性体现在孔位分布对浆液覆盖范围的影响,布置不合理会出现面积超过0.1平方米的灌浆盲区,无法实现全面填充。排气孔设置合理性敏感性直接关系灌浆过程中气体排出效果,排气不畅会使气体滞留形成直径大于2毫米的孔隙,降低灌浆体密实度。导管架与钢桩贴合度敏感性影响灌浆体受力传递效果,贴合度不足导致间隙超过3毫米时,会引发局部应力集中,削弱灌浆结构的承载稳定性。

1.3 灌浆施工参数敏感性

灌浆压力控制敏感性贯穿施工全过程,压力超过1.5兆帕可能损坏周边结构,引发浆液渗漏;压力低于0.5兆帕则无法推动浆液充分扩散,难以达到设计密实度要求。灌浆速度敏感性影响浆液填充质量,速度超过2立方米每小时易产生紊流,裹挟气体形成孔隙;速度低于0.5立方米每小时会延长灌浆时间,增加浆体初凝风险,影响整体填充效果。灌浆顺序敏感性关乎浆液扩散的均匀性,顺序不当会导致先灌浆液堵塞后续通道,形成长度超过1米的局部填充不足区域。施工环境温度对灌浆效果的敏感性体现在温度变化对浆体凝结特性的影响,温度超过35摄氏度会加速浆体凝结,缩短施工操作时间至1小时以内;温度低于5摄氏度则会延缓强度发展,降低浆体与基体的结合性能。

2 海洋环境因素对灌浆效果的敏感性分析

2.1 水文环境因素敏感性

海水流速对灌浆扩散的敏感性体现在流速变化直接干扰浆液扩散路径与范围。流速过快会产生剪切力破坏浆液扩散形态,导致浆液无法按设计区域填充,甚至被

水流冲刷稀释,降低灌浆密实度^[2]。海水压力对灌浆密封性的敏感性影响灌浆体抗渗漏能力,压力变化会改变灌浆界面受力状态,压力过高可能突破灌浆密封结构,引发浆液渗漏,压力不足则难以保证浆液与基体的紧密贴合。潮汐变化对灌浆施工的敏感性关乎施工连续性与质量稳定性,潮汐涨落带来的水位与压力波动,会影响灌浆压力控制精度,可能导致填充不充分或局部结构受力不均。海水侵蚀环境对灌浆体耐久性的敏感性直接决定长期使用性能,海水含有的盐分等腐蚀性物质会逐步侵蚀灌浆体,破坏内部结构完整性,降低承载能力与使用寿命。

2.2 气象环境因素敏感性

风速对高空灌浆作业稳定性的敏感性影响施工操作精度与安全性,风速超过10米每秒易导致灌浆设备晃动、浆液输送偏移,无法精准控制灌浆点位,增加施工误差风险;误差值可达10厘米以上。降雨对浆体性能的敏感性体现在雨水混入会改变浆体配比与浓度,当单次降雨量超过20毫米时,稀释后的浆体胶凝性能下降,凝结时间延长,强度发展受阻,严重时可能导致灌浆体结构松散。极端温度对灌浆过程的敏感性涵盖高温与低温两种情况,环境温度超过40摄氏度会加速浆体水分蒸发与凝结进程,缩短施工操作窗口至0.5小时以内,易形成局部未填充空洞;环境温度低于0摄氏度则会延缓浆体凝结与强度发展,降低浆液与基体的结合效果,甚至可能因冻胀作用产生2毫米以上的裂缝,破坏灌浆结构。

2.3 地质环境因素敏感性

地基沉降对灌浆结合面受力的敏感性影响整体结构稳定性,地基沉降会使灌浆结合面产生附加应力,沉降量过大可能导致结合面剥离,削弱灌浆体的承载传递作用。海底表层土体稳定性对灌浆施工的敏感性关乎施工基础安全,土体失稳易引发灌浆设备倾斜、施工区域坍塌,中断灌浆作业进程,同时破坏已完成的灌浆结构。地质构造振动对灌浆体完整性的敏感性体现在振动会使未完全硬化的浆体产生裂缝,即使硬化后的灌浆体也可能因振动冲击出现破损,影响结构整体性与密封性,降低灌浆系统的防护与承载效能。

3 灌浆敏感性分析方法体系

3.1 敏感性分析指标构建

在开展灌浆敏感性分析时,构建科学合理的分析指标是基础。对于灌浆体力学性能指标敏感性量化标准,需综合考虑抗压强度、抗剪强度、弹性模量等关键力学参数。这些参数能直观反映灌浆体在不同受力条件下的承载能力与变形特性^[3]。通过设定不同参数变化范围,观察

其对灌浆体整体力学性能的影响程度,进而量化各参数敏感性,为后续分析提供量化依据。灌浆结合面工作性能指标敏感性判定依据聚焦于结合面的粘结强度、抗滑移能力等。结合面作为灌浆体与结构连接的关键部位,其工作性能直接影响结构整体稳定性。通过分析不同因素对结合面性能的影响,明确各因素变化时结合面性能的变化趋势,以此判定各因素敏感性。灌浆系统长期稳定性指标敏感性评价维度涵盖耐久性、抗疲劳性能等。长期处于复杂环境与荷载作用下,灌浆系统性能会逐渐退化。从这些维度出发,研究不同因素对灌浆系统长期稳定性的影响,评估各因素敏感性,有助于预测灌浆系统使用寿命,提前采取维护措施。

3.2 敏感性分析模型建立

数值模拟模型在敏感性分析中发挥着重要作用。借助有限元分析软件,构建灌浆系统三维数值模型,模拟不同参数变化下灌浆体受力与变形情况。通过对比分析模拟结果,直观呈现各参数对灌浆系统性能的影响,为敏感性分析提供可视化数据支持。理论分析模型构建与敏感性参数识别紧密相连。基于材料力学、结构力学等理论,建立灌浆系统理论分析模型,推导关键参数与系统性能之间的理论关系式。通过对理论关系式的分析,识别出对系统性能影响显著的敏感性参数,为后续深入研究指明方向。多因素耦合敏感性分析模型搭建考虑了实际工程中多种因素相互作用的复杂性。在单一因素分析基础上,将多个因素同时纳入分析模型,研究各因素之间耦合作用对灌浆系统性能的影响。这种模型能更真实地反映实际情况,提高敏感性分析的准确性与可靠性。

3.3 敏感性排序与影响权重确定方法

单因素敏感性排序方法通过比较不同因素对灌浆系统性能的影响程度,将各因素按敏感性大小进行排序。通常采用控制变量法,分别改变单一因素取值,观察系统性能变化,根据变化幅度确定因素敏感性顺序。多因素交互作用下敏感性权重确定需综合考虑各因素之间相互作用。采用层次分析法、模糊综合评价法等,将多因素敏感性分析问题分解为多个层次,通过专家打分、数据统计等方式确定各因素权重,全面反映各因素对灌浆系统性能的综合影响。敏感性阈值界定方法旨在明确各因素变化对灌浆系统性能产生显著影响的临界值。通过大量试验与模拟分析,确定系统性能发生突变时各因素的取值范围,以此作为敏感性阈值,为工程设计与施工提供安全预警依据。

4 基于敏感性分析的灌浆系统优化方向

4.1 灌浆材料性能优化

通过敏感性分析,能精准定位对灌浆系统性能影响较大的高敏感性参数。针对这些参数,材料配方调整方向需聚焦于精准调控关键成分比例。例如,若胶凝材料配比敏感性较高,可深入探究不同种类胶凝材料的特性,优化它们之间的搭配组合,以提升浆体整体性能稳定性。对于外加剂掺量敏感性突出的情况,通过大量试验筛选出最佳掺量范围,确保外加剂能充分发挥改善浆体流动性、凝结时间等性能的作用,同时避免因掺量不当引发负面效应^[4]。抗环境敏感性的灌浆材料改性思路着重于增强材料对复杂环境的适应能力。在海洋环境中,海水侵蚀、温度变化等因素对灌浆材料性能影响较大。可考虑引入具有抗腐蚀特性的矿物掺合料,提高浆体抗化学侵蚀能力;添加适量的纤维材料,增强浆体抗裂性能,减少因温度变化产生的收缩裂缝。通过这些改性措施,使灌浆材料在不同环境条件下均能保持稳定性能,降低环境因素对灌浆系统的影响。

4.2 灌浆构造与施工工艺优化

降低构造参数敏感性的结构设计优化需从灌浆间隙尺寸、灌浆孔布置等关键构造参数入手。合理调整灌浆间隙尺寸,使其既能保证浆体顺利填充,又能避免因间隙过大导致浆体用量增加、成本上升,或因间隙过小造成浆体流动困难,优化后的间隙尺寸宜控制在5-20毫米区间。优化灌浆孔布置方式,依据结构受力传递路径与浆体扩散规律,确定灌浆孔数量为6个、位置与间距为1.5米,确保浆体在环形空间内均匀分布,提高结构整体性能。削弱施工参数敏感性的工艺改进措施涵盖灌浆压力、速度与顺序等方面。精准控制灌浆压力,根据浆体性能与结构特点,设定合理压力范围为0.5-1.5兆帕,避免压力过大对结构造成损伤或压力过小导致浆体填充不充分。合理调整灌浆速度,结合浆体流动性与施工条件,将速度控制在0.5-2立方米每小时,确保浆体在填充过程中既不会因速度过快出现离析,也不会因速度过慢延长施工周期。科学制定灌浆顺序,依据结构受力传递路径与浆体扩散规律,划分3个灌浆区域,有序进行灌浆作业,提高施工效率与质量。

4.3 敏感性控制的质量保障方向

高敏感性参数的施工过程控制要点在于严格监控与实时调整。对胶凝材料配比、外加剂掺量等高敏感性参数,在施工过程中安排专人进行精确计量与记录,每批次浆体材料的计量误差需控制在1千克以内,确保每一批次浆体材料配比准确无误。实时监测浆体流动性、凝结时间等性能指标,一旦发现偏离设计要求,立即调整施工参数或材料配方,保证浆体性能稳定,监测频率应不少于1次每小时。环境敏感性因素的应对策略优化需提前预测环境变化对灌浆施工的影响。针对温度变化,在高温季节采取降温措施,如对原材料进行预冷处理、搭建遮阳棚等;在低温季节采取保温措施,如对浆体进行加热、搭建保温棚等,确保施工环境温度维持在5-35摄氏度区间。对于湿度变化,通过控制施工环境湿度或调整浆体配合比,降低湿度对浆体性能的影响,环境湿度控制目标为60%-80%。通过这些优化策略,有效应对环境敏感性因素,保障灌浆施工质量。

结束语

海上风机导管架基础灌浆敏感性分析是复杂且重要的工作。通过全面剖析核心参数与环境因素敏感性,构建分析方法体系并提出优化方向,有助于提升灌浆质量与风机稳定性。在后续工程中,应持续完善分析方法,结合实际情况灵活应用优化措施,保障海上风电事业持续健康发展。

参考文献

- [1]元国凯,雷天歌,房奇,等.海上风机导管架基础灌浆连接段轴向受压疲劳性能试验[J].结构工程师,2023,39(5):157-165.
- [2]游先辉.海上风机导管架基础灌浆连接偏心受压承载性能研究[J].能源与环境,2022(1):2-7,23.
- [3]郑荣坤,范永春,徐璐,等.大型海上风机导管架基础大直径钢管桩承载力与疲劳性能分析[J].海洋工程,2024,42(5):36-43.
- [4]劳俊源.海上风机桁架式导管架结构灌浆连接段的数值分析[J].红水河,2025,44(1):27-32,66.