

海上风电导管架基础水下灌浆技术研究

文/中国电建集团贵州工程有限公司 王 坤 甘国民

海上风力发电机组一般采用单桩基础结构和多桩基础结构。在建造时导管架与基础连接都会运用灌浆技术，但是各个海域的条件对施工技术的要求都是不同的，特别是那些复杂的海域环境往往无法保证水下灌浆施工工作的效果和质量，并且也会对海上风电机组基础支撑结构的安装造成诸多的限制。因此需要对海上风电基础连接技术进行分析研究。

导管架结构在实践运用中整体效果较为良好，并且在实践中得到了大范围的运用，这类结构往往都被人们引用到了风电场之中。海上风电一般采用灌浆方式完成导管架与钢管桩的连接，而灌浆质量与导管架整体结构的设计效果往往存在密切的关联，如何合理地运用灌浆技术在海上风电导管架与钢管桩连接中发挥关键性作用，受到了人们的广泛关注。就当下实际情况来看，灌浆技术在我国风电场的建设中得到了高效的运用，并借助水下灌浆的方法来完成浆液的灌溉。因为海上地区环境十分的复杂，所以对实践工作的实施带来诸多困难，并且对水下灌浆施工技术要求相对较高，特别是在遇到较为恶劣的天气情况时，外界诸多不良因素都会对海上风机组基本支撑结构的安装工作形成一定的不良影响，极易导致风电场工程施工工作停滞的情况。

导管架基础灌浆连接

针对导管架与钢管桩桩基基础结构进行灌浆连接，促使二者形成一个完整的整体，这一方法在实践运用中具有良好的实用性，并且施工效率较高。在我国海上石油平台的运用中累计了大量的实践经

验，这一方法在很多国家的海上风电场中得到了运用，效果较为良好。通过大量的实践调查分析发现，与灌浆连接强度存在关联的因素主要为：①灌浆结构的整体质量和弹性参数；②灌浆环形空间的大小；③是不是使用剪力键；④灌浆结构的大小及桩体结构的各项参数；⑤与水泥浆体结构衔接的管道表层结构情况；⑥水泥结构的变形情况；⑦结构载荷情况。

很多经济发达的国家，在开始的阶段运用到灌浆连接段的各项参数计算工作之中的方法为API，总结出了海洋石油平台的支撑柱体灌浆连接段都是以受力轴为基础的，所以在既定的轴向载荷力的影响下，可以利用剪力键和无剪力键的轴向作用来传递载荷。DNV规范指出，在综合分析灌浆强度时，视为不存在任何关联的两种效应，综合考虑轴向力与弯矩力。总结出，灌浆连接应当确保达到下列两项独立标准：首先考虑弯矩和剪切力不同时作用，而轴向载荷和转矩互相影响，如果弯矩和剪切力对整个结构造成同时作用，务必要对承载力加以严格的把控；其次，如果没有同时出现轴向力及转矩，应确保结构承载能力满足实际需要。实际海上风机基础灌浆连接段可能受到轴力、转矩和弯矩三者的

组合作用，若按照DNV的方法设计，对于轴向荷载和转矩的作用可根据解析解计算，但对于弯矩和剪力作用，DNV只提出了灌浆体的应力要求，只能通过有限元或试验方法来分析。

就先打桩导管架与后打桩导管架相对比来说，其具有下列优越性：导管架基础有两种相类似的结构，在先打桩导管架的整个结构中并不需要存在桩靴，而后打桩导管架根据施工需要一般增设桩靴于支撑腿末端，会导致成本低额增加，尽管先打桩导管架底部与钢管桩灌浆连接，并且需要利用辅助支撑结构来进行加固。在打桩导管架结构安设结束之后，其都是被运用到石油的生产之中，但是大范围的风电场建造对于打桩导管架种类的要求较多，能够有效地缩减成本。后打桩导管架基础结构在实施安装工作时，往往都需要利用安装船只来实施安装工作，钢管桩安装工作的实施往往需要运用大量的安装船只来进行辅助。但是打桩操作并不需要利用专门的辅助船只，在进行桩体结构安装时需要使用到专门的工具和设备，导管架的安装和打桩工作的实施应当同步进行，从而提升工程施工的效率。

导管架基础水下灌浆材料

在实施水下灌浆施工时，通常所使用的都是普通的混凝土浆液，也可以调换为高强度灌浆材料，但是要想从根本上对海上风电机组导管架基础水下灌浆施工工作的施工质量加以保障，应当尽可能地选择高强灌浆材料。高强灌浆材料具有较强的收缩补偿性，可以与水进行充分的混合，可以配置出达到规定标准要求的灌浆材料。高品质的灌浆材料通常都拥有一定的流动性，抗离析性能较强，正因为存在诸多优越性，可以确保在进行泵送时不会发生堵塞的情况，也可以完成远距离的泵送。灌浆材料的性能和质量往往会对海上风电机组基础结构的使用情况和使用寿命造成巨大的影响。使用的环境和条件不同，所表现出来的性能也不同，在实践运用时应当进行适当的调整。

灌浆材料作为灌浆施工的主体，对灌浆施工质量安全起着至关重要的作用，保证灌浆材料符合项目灌浆施工技术规范，方可允许灌浆材料入场并进行灌浆。灌浆材料入场检验程序应为：书面资料提供→出厂报告提交→现场原材料进场抽检→材料送

检→报告提交→灌浆材料入场。灌浆材料发货前或进场后通知监理到场进行材料取样并送至具有检测资质的第三方检验机构进行材料复检。灌浆施工前核对灌浆料的合格证及生产日期，其质保期为自生产之日起6个月。

导管架基础灌浆结构

1. 先打桩导管架支撑腿结构

先打桩导管架结构支撑结构与钢管桩进行连接，就可以构成完整的导管灌浆系统，在支撑腿的末尾设置需要的挡板结构，将导管架在整个结构底层进行安设，为避免支撑腿与钢管桩轴间距超过规定情况，可借助导向架实现支撑腿在海底指定位置的安设，确保两者之间可以达到规定的标准，否则会导致环形密封圈一边的压力超出规定范围而出现结构破损的情况，从而保证施工工作的质量和效率。

2. 封浆结构

在将法兰结构放置到钢管桩的顶层时，法兰表层需要安设专门的密封圈，密封圈的形状可以选择环形橡胶材料，确保与底层的结构相连接，通过环形密封与导管架支腿端部实现对钢管桩的密封，防止混凝土浆液溢出，避免浪费，同时保证灌浆施工质量，从而提升钢管整体的密封性。

3. 灌浆设备及管线布置

先打桩导管架支撑结构内部中设置了专门的光导管，这个结构的顶部应当与整个支架进行连接形成完整的整体，下层结构需要与导管的支撑腿的末端统一放入到钢桩结构上层端口中。灌装过程中运用到的导管末端应当安设专门的分支导管，保证工作能够按照规定进行，且灌浆管的设置需要与环形橡胶垫相连接，从灌浆位置来实施灌浆施工工作。

灌浆施工时，灌浆系统均布置于吊车周围及主甲板边缘区域，故应保证甲板表面干净整洁，灌浆料及灌浆设备摆放合理。在进行施工现场布置时，为便于施工，减少搅拌及泵送设备的灌浆软管连接长度，应尽可能靠近导管架灌浆管线端口并靠甲板边缘布置，可采取图1导管架灌浆管线布置；此外，灌浆材料、设备、沉淀容器及备用泵等做到吊车工作区域全覆盖，且在吊机驾驶员的视野操作范围内，使得灌浆材料袋从搅拌机的顶部被安全送到

搅拌机中进行搅拌；对更换泵送设备必须留有足够的时间和空间，灌浆施工用设备可采取方案见表1。

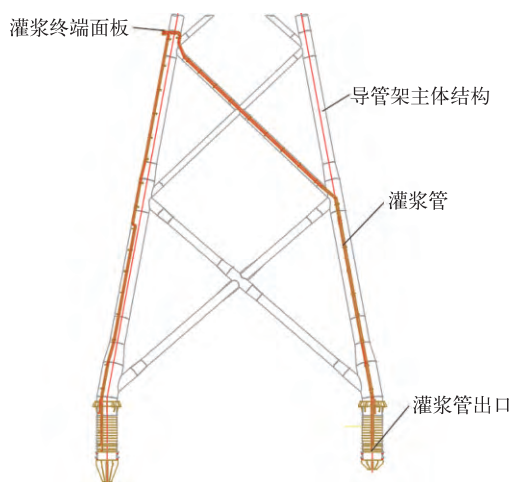


图1 导管架灌浆管线立面布置示意图

表1 灌浆设备明细表

序号	设备名称	规格型号	数量	备注
1	搅拌机	每台进料1200 L、出料750 L	2台	2台交替使用
2	进水系统	含1台钢制水箱、2台水泵、2台计量水箱	2套	搅拌机配套使用，备用水包1只
3	灌浆泵	流量40 m ³ /h，出口压力11 MPa，45 kW	2台	1用1备
4	灌浆软管	口径80 mm，8 MPa，6 m/根	150 m	含备用
5	海上灌浆实验室	6 m标准集装箱式房屋	1座	内配试模、养护箱、压力机等实验仪器设备
6	潜水泵	流量25 m ³ /h，扬程30 m，4 kW	1台	

导管架基础及连接段水下灌浆技术

1. 导管架基础灌浆

在海上风电项目中，导管架灌浆连接通常采用泵送压浆的方式将灌浆料灌注到海平面以下的灌浆连接段。导管架灌浆主要是基于以下方面制定：①水下钢管桩满足施工要求；②灌浆系统的灌浆速度；③灌浆浆体检测过程；④灌浆工作的前期准备。其工艺施工流程如图2所示。

海上风机结构所受到的力极为复杂，包括风机叶片和风机自身旋转以及塔桶造成的风机载荷、波浪力、潮流力及船舶的撞击力等，这就决定了近海风电导管架基础的灌浆连接尤其重要。因为各个形

式的灌浆方法所使用到的结构不同，所以导致的结果也是有所差别，对于各种连接结构结合实际需要来选择适合的方法。其中导管架基础灌浆连接是导管架安装过程中最为有效的一种基础连接方法，但被安设在底层的位置，无法进行短周期的检查，所以在施工过程中需要对施工质量加以保障。

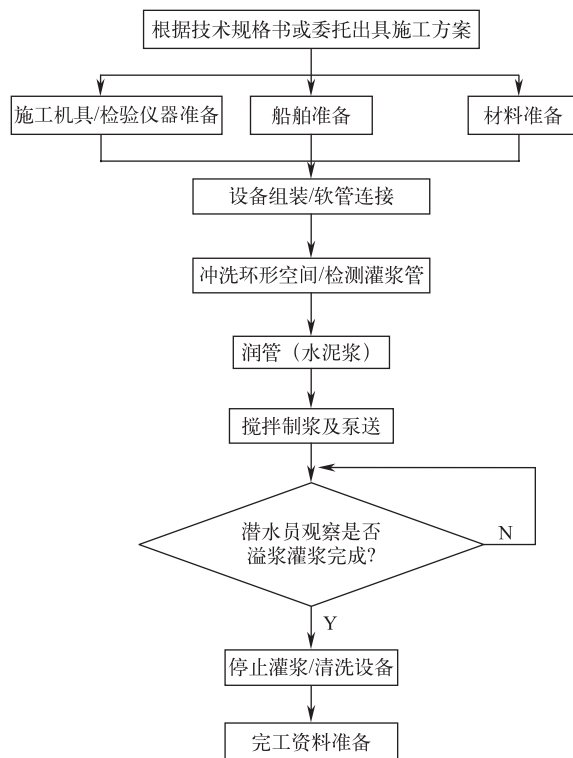


图2 导管架灌浆工艺流程图

2. 先桩法导管架连接段灌浆

先桩法导管架基础的灌浆管线和灌浆孔在施工过程中通常都是被设置在导管架的支撑框架上，在外界钢管桩及内层导管二者之间会采用灌浆施工的方法来进行结构的加固，导管架基础连接位置灌浆施工工作应确保不会出现裂缝，在连接结构的底层向上到一半的弹性长度之中，弯矩的影响程度较小，连接位置顶层往下弯矩影响程度较大。

以某项目为例，导管架基础需灌浆的部位为桩顶（-35.6~-40.8 m）至主密封圈之间导管架与钢管桩之间的环形空间内，长度5.2 m。主密封圈下设置次密封圈（-41.45 m），作为防漏浆措施。导管架灌浆段支腿主结构长度为6 m，导管腿导向装置长度为1 100~2 500 mm，灌浆连接段具体结构示意图如图3所示。

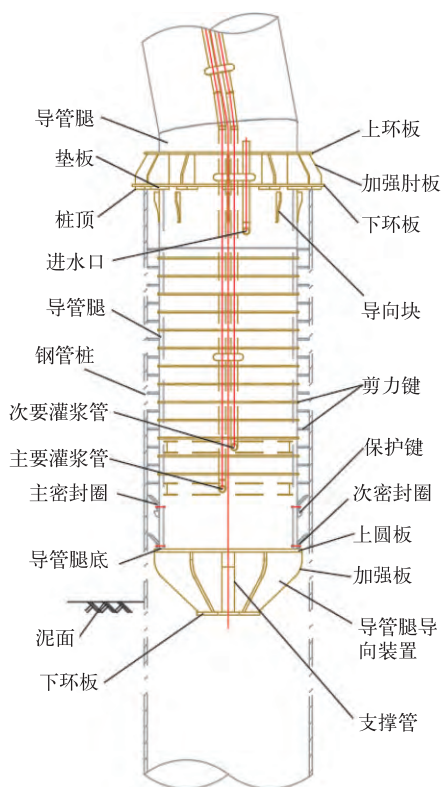


图3 导管架灌浆连接段结构示意图

3. 灌浆应急处置措施

海上风电灌浆作业条件严格按照海上风电施工规范GBT 50517和灌浆施工规范GB 50048执行，一旦灌浆现场条件不适合或者不能安全进行灌浆工作时，将不会开始灌浆作业直至条件改善达到灌浆施工要求后方可开始灌浆。在泵送灌浆料时，通常需要安排一人观察泵车回压数据，保证在灌浆压力过高时采取停止泵送措施，以避免软管灌浆软管及入口的堵塞。因此必须掌握相关应急处置措施。

(1) 管线堵塞

灌浆期间，技术人员须时刻注意压力变化，当泵车压力异常时，须立即换挡降压继续灌浆，并尝试反泵疏通，如灌浆压力继续增大，须立即结束灌浆，并及时泄压检测管路情况，在合适位置如管线转向的地方将其拆卸，此处最容易堵塞，然后判断卸口处压力大小，一般有两种情况：一是卸口处前方堵塞；二是卸口处后方堵塞，前者压力大，后者压力小，依此类推查找管线堵塞位置。如是灌浆软管一段堵塞，立即更换备用管线，如是导管架管线堵塞（桩内淤泥堵塞），须切换使用导管架备用灌浆管线。上述方法难以解决管线堵塞问题，可采取

直插式灌浆管，其制作需匹配溢浆口的大小以便完全契合环形空间，随着灌浆液面高度的变化向外抽管，然后按相关工艺流程进行后续操作，直至溢浆后通知专业工程师确认是否灌浆停止。

(2) 防漏浆措施

1) 密封圈。作为避免漏浆的构件，常用来封隔灌浆区域与海底，一般设置在钢管桩与导管架处与之契合，为保证灌浆效果采用环状橡胶材质，达到灌浆区域底部被封隔的目的。

2) 灌浆打底。灌浆管线的设置尤为重要，通常在导管架顶部设置露出水面的灌浆终端面板，底部设置主要和次要灌浆出口，为保证施工质量而采取灌浆打底措施，即先连接灌浆软管管线，灌少量浆液，待此部分浆液凝固达到一定强度后，再进行正式灌浆，打底的灌浆部分凝固后可以作为新的封堵结构，以保证灌浆区域的密封性。

(3) 漏浆应急措施

当灌浆施工过程中发现灌浆方量超过设计灌浆量的110%时，潜水员未发现灌浆桩顶有溢浆出现，则考虑密封圈部分失效，此时应继续进行灌浆作业直至桩顶有溢浆出现；当灌浆方量超过设计灌浆量的150%时，潜水员仍未发现灌浆桩顶有溢浆出现，则可判断封隔器完全失效，此时立即停止灌浆作业并商量解决方案。如提前感觉密封圈有损坏的情况，可先设置灌浆塞，用量2~3 t灌浆料，待灌浆凝固后再继续灌浆。另外，为确保灌浆施工的连续性，多预备总标段所需的20%的灌浆料和10%的润管料。

结束语

我国是世界人口大国，所以国家的发展需要运用到大量不同类型的资源，从而导致人们更加关注新型节能能源。海上发电机组应当保证施工技术的水平，通过对钢管桩、导管架及灌浆技术进行分析研究，满足海洋工程环境保护及文明施工要求，在制定各项专项措施的情况下，保证了测量工作、钢管桩施工、导管架安装及灌浆作业等关键工序质量控制和合理实施，确保项目质量目标的实现，具有巨大的现实意义，能为推动海上风电朝深海化、大型化发展奠定基础。EA

(收稿日期：2022-01-07)