

海上风电灌浆连接段疲劳机理研究综述

刘东华¹, 元国凯¹, 陈涛², 王銜²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 同济大学, 上海 200092)

摘要: 海上风机基础灌浆连接段会受到自重及风浪作用产生的轴向荷载和弯矩荷载, 由于风浪荷载的时变性, 荷载的方向和大小具有随机性, 在海上风机 20 年或 25 年的服役期内, 会承受多达 10^9 次荷载效应, 疲劳问题突出。对钢结构、灌浆材料、整体结构三方面进行疲劳性能评估, 并着重描述了无剪力键与带剪力键灌浆连接段疲劳机理试验研究, 最后总结了海上风电灌浆连接段的疲劳机理研究。

关键词: 海上风电; 风机基础; 灌浆连接段; 疲劳机理

中图分类号: TM617

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)S1-0068-05

Review on Fatigue Mechanism of Grouted Connection in Offshore Wind Farm

LIU Donghua¹, YUAN Guokai¹, CHEN Tao², WANG Xian²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Self-weight as well as wind and wave loading cause the axial load and bending moment in the part of grouted connection of offshore wind turbine foundation. Due to the time variation of the wind and wave, stochastic direction and size of the loa, the turbine and its foundation will withstand load effects as many as 10^9 cycles in the service period of 20 years or 25 years. Therefore, fatigue problem is severe. In this paper, the fatigue performance evaluation of steel structure, grouting material and integral structure is described, and then the fatigue mechanism of the connection with/without shear keys is studied. Finally, fatigue mechanism of grouted connection is summarized.

Key words: offshore wind; wind turbine foundation; grouted connection; fatigue mechanism

海上风电基础灌浆采用的材料为高强灌浆材料, 是一种含收缩补偿技术的水泥类灌浆材料, 当与水混合时, 其可形成均匀、可流动且可泵送的灌浆料。针对海上风机基础灌浆的特殊需求和特殊施工方法, 高强灌浆料需要具备大流动性、抗离析可靠性和稳定性、高早期强度、高最终强度、高弹性模量、高体积稳定性、高抗疲劳性能、低水化热等特点。

海上风机基础灌浆连接段会受到自重及风浪作用产生的轴向荷载和弯矩荷载, 由于风浪荷载的时

变性, 荷载的方向和大小具有随机性, 在海上风机 20 年或 25 年的服役期内, 会承受多达 10^9 次荷载效应, 疲劳问题突出。

灌浆连接段是由钢结构和灌浆材料组成的组合结构, 故其疲劳问题应当分成钢结构、灌浆材料以及两种材料组成的构件整体疲劳性能三部分。

本文首先从钢结构、灌浆材料、整体结构三方面描述了各自的疲劳性能评估, 接着着重描述了无剪力键与带剪力键灌浆连接段疲劳机理试验研究, 最后对海上风电灌浆连接段疲劳机理研究进行总结。

1 钢结构的疲劳性能

对于灌浆连接段中钢管的及其上焊接剪力键的焊缝疲劳性能, 研究已经比较成熟, 可参考的钢结构疲劳规范很多, 如 DNVGL-RP-0005^[1], 采用“热

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风机基础建造、安装以及大直径桩基沉桩可实施性和风险评估研究”(EV02971W)

作者简介: 刘东华(1982), 男, 蒙古族, 辽宁葫芦岛人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工工程结构设计研究工作(e-mail)liudonghua@gedi.com.cn。

点应力”法对某一荷载工况下的灌浆连接段段有限元模拟的计算结果进行分析, 以此预估此灌浆连接段段内钢管和剪力键焊缝的疲劳寿命。由于钢管本身的缺陷相对于钢管表面焊接的剪力键来说较少, 所以此处对结构的疲劳性能主要指焊接剪力键处的疲劳性能, 但两者评估的方法是相同的。

2 灌浆材料的疲劳性能

高强灌浆材料是一种超高强度、高弹模的水泥基类材料, 资料显示, 其性能与高强混凝土类似, 故许多文献中采用混凝土的本构关系对灌浆材料进行有限元模拟。单纯针对灌浆材料疲劳性能的试验研究较少, 目前找到的文献有丹麦 Aalborg 大学研究者 Eigil V. Sørensen 的研究报告及期刊论文^[2]。论文作者研究了直径 60 mm, 高度 120 mm 的圆柱体灌浆材料试件在反复压力荷载下的疲劳性能, 并探究了荷载幅和荷载频率对灌浆材料疲劳性能的影响, 最为重要的是, 作者研究了在空气中疲劳和水中疲劳性能的不同。试验采用荷载控制, 加载速率为 0.88 MPa/s, 最小荷载 20 kN, 相当于试件内 7.1 MPa 应力; 循环荷载采用在正弦曲线加载, 加载直到试件破坏, 或 200 万次则停止。

实验结果如图 1 所示, 最大应力为静力抗压强度 60% 的许多试验点落在 2007 版 DNV-OS-J101 规范^[33]中的曲线下方, 即此曲线会高估试验灌浆材料的疲劳寿命; 而试验点全部落在 2012 版 DNV-OS-C502 规范^[3]曲线的上方, 可见新版规范的 S-N 曲线摒弃了原有曲线可能高估灌浆材料疲劳性能的缺点, 采用了更加保守的估计方法, 为灌浆连接段的设计增添了安全性。

此外, 从图中易知, 试验具有较大的离散型, 这与大部分最大应力低于静力强度 80% 的素混凝土疲劳试验结果一致。然而在水中的试件整体上比空气中的试件疲劳寿命低, 在水中测试的试件中, 0.35 Hz 荷载频率下的试件疲劳寿命又明显低于在 5 Hz 及 10 Hz 频率下的试件。作者认为, 这可能是由于在水中进行疲劳试验时, 水分进入或被挤出开裂的试件, 引起了局部的应力, 导致了试件的疲劳寿命较低; 而在 0.35 Hz 下, 水分在一个荷载循环内有更多的时间进入构件内, 故在此频率下疲劳寿命更低。然而, 与之相反的是在空气中试验的试件, 其疲劳寿命几乎与荷载频率无关。但是需要注

意的是, 在 45% 静力强度的疲劳荷载下, 试件在水中的疲劳寿命仍超过 150 万次, 即在此荷载水平下, 水中的疲劳强度并不比空气中低。

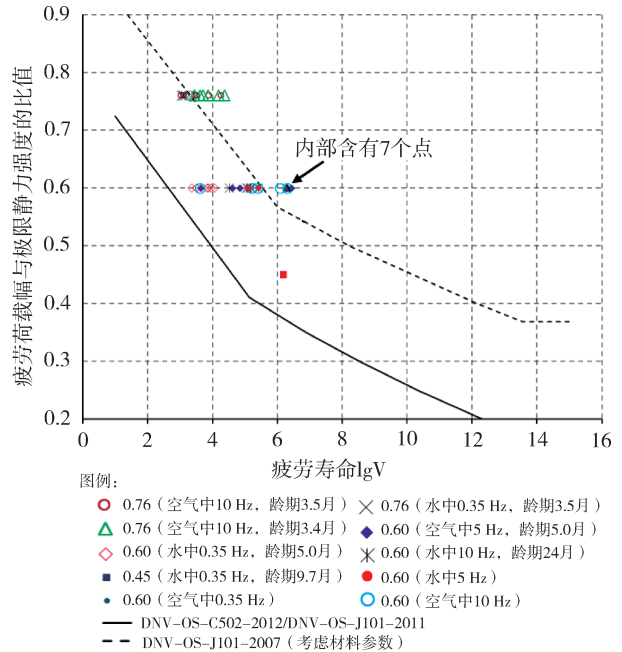


图 1 Aalborg 大学灌浆材料疲劳性能试验结果

Fig. 1 Fatigue test results of grout material in Aalborg University

3 灌浆连接段的整体疲劳性能

对于灌浆连接段的整体疲劳性能, 最新版 DNV-OS-J101 规范^[4]给出了单层剪力键上的作用力与其承载力的比值 y 和疲劳循环次数 N 关系曲线。随后规范结合带剪力键灌浆连接段静力极限承载力的相关验算结果, 对单桩和导管架结构的 y - N 曲线进行了分别定义。值得注意的是这两种结构的疲劳寿命曲线是一致的, 该曲线具体形式如下:

$$\lg N = 5.400 - 8y \quad y \geq 0.30$$

$$\lg N = 7.268 - 14.286y \quad 0.16 < y < 0.30 \quad (1)$$

$$\lg N = 13.000 - 50y \quad y \leq 0.16$$

式中: y 为某一荷载循环下, 单层剪力键上所受荷载和剪力键承载力的比值, 即:

$$y = \frac{F_{v1Shk} \cdot \gamma_m}{F_{v1Shkcap}} \quad (2)$$

式中: γ_m 为材料参数, 在疲劳极限状态时可取为 1.5。

由于带剪力键大尺寸灌浆连接段模型抗弯试验较少, 只有本文中描述的 2007—2011 年 GL 试验及 2011—2012 年 DNV 试验, DNV-OS-J101 规范^[4]中

的 $S-N$ 曲线制定参考了这两组试验, 其结果是这两组试验点的下包曲线, 如图 2 所示。由此图可知, 规范^[4]中给出的曲线是一条考虑了保证率的下包络线, 较为保守, 故此曲线并不能很好的预估灌浆连接段的疲劳寿命, 只能用作疲劳极限状态的设计。需要进一步的试验及有限元研究才能更准确的评估灌浆连接段的疲劳寿命。

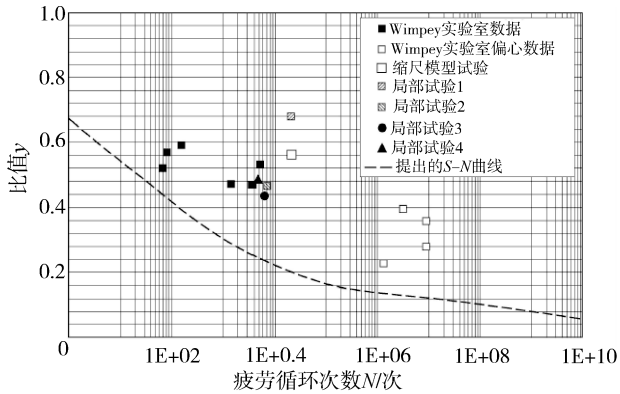


图2 灌浆连接段疲劳试验数据及 $y-N$ 曲线^[5]

Fig. 2 Fatigue test result of grouted connection and $y-N$ curve^[5]

4 灌浆连接段疲劳试验性能研究

我国海上风电灌浆技术相关的研究工作大部分主要为静力轴向荷载的试验及静力压弯数值模拟, 而灌浆连接段在反复弯矩作用下的疲劳性能研究基本为空白; 国外的海上风电研究始于上世纪 70—80 年代, 石油平台的研究历史更为悠久, 对于灌浆连接段的疲劳研究比较丰富。

4.1 轴压疲劳试验

1980 年, 研究者 Billington 和 Tebbett^[6] 对有剪力键灌浆连接段进行了轴向疲劳试验研究。试验荷载为应力比 R 等于 -1 的拉压反复荷载, 并使用了两种荷载频率, 考虑短期的试验时, 荷载频率为 0.1 Hz , 而较长期试验荷载频率为 3 Hz 。通过五个相同尺寸的试件在不同荷载幅条件下的疲劳寿命得到了一条探究性的 $S-N$ 曲线, 并且得出结论: 在疲劳荷载低于静力极限强度 40% 的条件下, 灌浆连接段不会出现疲劳破坏 (有待进一步长期试验验证)。值得注意的是, 文中引用了 1977 年英国海洋混凝土工程研究报告中的相关结论: 频率在使用荷载频率内变化时, 对疲劳寿命的影响较小。这点与研究者的 Sørensen^[2] 的研究结果部分一致。

灌浆材料的强度对于连接段轴向疲劳性能的影响也引起了研究者的广泛关注。1986 年, 研究者 Boswell 和 DMello^[7] 研究了灌浆材料强度对于有剪力键灌浆连接段疲劳性能的影响, 试验中主要通过不同龄期实现了灌浆材料强度的不同, 采用正弦曲线拉压等应力幅加载, 采用的加载频率为 $0.1 \sim 0.5 \text{ Hz}$, 模拟了北海(欧洲)的海浪频率标准值。

2006 年, 研究者 Lohaus 和 Anders^[8] 对超高强混凝土灌浆连接段开展了研究, 文中没有具体的试验参数, 但是有结论: 超高强混凝土的疲劳性能低于普通混凝土, 这个观点针对超高强混凝土, 但是对于新型灌浆材料不一定适用, 故需要对灌浆材料的力学性能做出研究。2010 年 Schaumann^[9-10] 等研究者采用了多种灌浆材料强度下, 较小尺寸的试件进行了试验, 试验荷载比 $R = 0.1$, 即只有受压重复荷载循环, 其疲劳结果明显高于文献^[7-8] 的结果。由于前述文献中灌浆材料强度的影响叙述不一, 更加说明有必要对灌浆材料的力学性能进行研究。同时应当注意到, 文献^[9-10] 采用的试件直径较小, 径厚比较大, 本身强度较高, 且只在受压重复荷载条件下进行试验, 不同灌浆材料强度试件在 200 万次有限循环下都未发生破坏, 不能得出疲劳性能与灌浆材料强度基本无关的结论。这种现象同时也表明了荷载比和加载路径的重要性。同样反映荷载比值重要性的试验还有文献^[11], 文中记载无剪力键灌浆段在单压循环荷载下疲劳性能较好, 文中建议无剪力键试件拉压循环荷载作用下, 当拉应力小于静力强度的 20% 时可以不考虑疲劳破坏; 对于有剪力键灌浆连接段, 在拉压循环作用时, 拉应力在循环中出现的比重越大, 循环下的强度与静力强度的比值越低, 在单压循环时, 应力幅较小的试件疲劳强度高。

4.2 弯曲疲劳试验

目前, 国外研究者对于灌浆连接段的抗弯疲劳性能的试验研究主要包含在此前介绍的三个研究计划中, 分别是 2001 年丹麦 Aalborg 大学进行的较小尺寸缩尺试验; 2007—2009 年德国劳氏船级社联合德国 Hannover Leibniz 大学进行的较大尺寸的缩尺试验; 2011—2012 年挪威船级社进行的局部体系试验。试验的部分结果发表成为论文形式, 还有一部分已经被写进规范^[12]。

2001 年丹麦 Aalborg 大学进行了一系列无剪力

键和有剪力键的较小尺寸缩尺试验, 并由 Tech-wise A/S 出具了相关试验报告, 文献[13]及文献[14]只涉及有限的无剪力键试件的结论, 且两篇文献对于试件几何尺寸的描述不完全相同。但在文献[15]中有较为清楚地描述此试验, 且试验几何尺寸与文献[14]中描述相符。疲劳极限采用常幅疲劳荷载进行加载, 循环加载 10^6 后, 所有试件灌浆材料都无明显的开裂及剥落现象发生。所有试件刚度基本在循环中保持不变, 且由于疲劳试验荷载小于极限荷载值, 疲劳荷载下刚度较大。可能由于此试验中无剪力键试件与有剪力键试件相比并没有很强的优越性, 故当时认为没有必要使用剪力键, 这就为无剪力键单桩基础的滑移破坏埋下了隐患。之后研究者^[41]对此试验结果进行了分析, 认为可能是试件相对较小的径厚比与较长的灌浆段长度 ($L/D_p = 1.5$), 使得试验结果不能运用于以后实际工程中的较大径厚比及较短灌浆段长度的无剪力键单桩基础。因此本试验得出的结论并不具有很高的价值, 也说明需要进一步试验研究灌浆连接段在反复弯矩作用下的疲劳性能。

2007—2009 年德国劳氏船级社联合德国 Hannover 大学做了一系列较大尺寸缩尺试验, 进行了相关数值模拟研究, 并发表了一系列文章^[12,15-20], 涉及无剪力键及有剪力键试验。文献[12]对无剪力键试件受弯疲劳性能做出了较为详尽的描述。文献[16-20]中有剪力键试件的研究集中在有无剪力键、连接段长度、灌浆料的抗压强度等因素对抗弯疲劳性能的影响, 试验荷载状况与无剪力键试件相同。

从循环荷载作用下刚度的退化过程可以看出, 采用抗压强度较高的灌浆材料及较长的连接段, 在循环 10 000 次左右后, 刚度的退化曲线基本为水平线, 即疲劳应力循环次数较多时, 对构件的刚度影响较小; 而连接段长度较短或材料强度较低时, 则需要考虑在疲劳循环过程中材料性能的不断退化。同时文献[20]还表明, 对经过弯曲疲劳后试件的残余轴向承载力进行监测, 发现经过疲劳荷载后轴向承载力仍具有较好的延性, 且轴向承载力仍然是设计荷载的许多倍; 轴向承载力与灌浆材料抗压强度基本无关, 只与连接段长度和剪力键个数相关。

2011—2012 年, 为验证其提出的无剪力键灌浆连接段抗弯承载力的公式, 并进一步了解有剪力键

灌浆连接段疲劳性能, DNV 进行了局部试验研究^[5]。试件设计的思路是: 考虑到圆管直径非常大, 可以将其局部视为平板。进一步考虑到连接段施加荷载的对称性以及剪力键布置对称, 可以将平板试件进一步对称, 形成图 3 所示的试验装置。



图 3 挪威局部试验试件示意图

Fig. 3 Photo of Norway test specimen

试验中, 在局部试验的中间板上施加轴向反复荷载, 在“径向”受到灌浆材料的约束作用, 而“环向”变形没有约束。试验结果验证了最新 DNV 规范中抗弯承载力近似理论解的可行性, 对等效刚度采用设计系数 ψ 进行修正。通过比较加载过程中的不同荷载条件下的荷载位移曲线, 发现曲线位于 $\psi = 0.5$ 时的计算直线和 $\psi = 1.0$ 时的计算直线之间, 如图 4 所示。

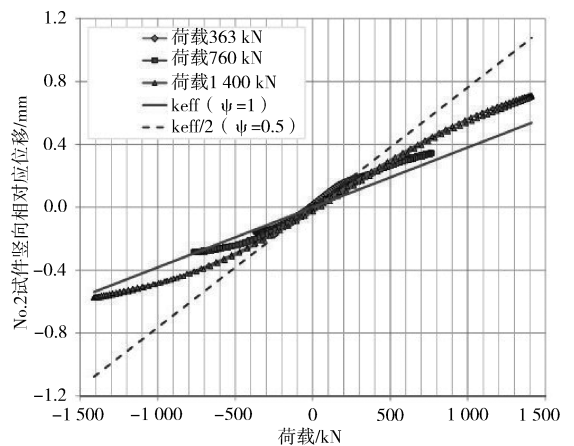


图 4 局部试件荷载位移曲线图

Fig. 4 Load-Displacement curve of test specimen

由于看到局部试验与缩尺试验在两端部剪力键附近的破化情况明显不相同。由此, LOTSBERG 认为仍然应当采用缩尺试验进行研究。

目前的试验结果, 证明了小径厚比的缩尺试验不

能真实地反映工程中大直径薄壁钢管灌浆连接段的抗弯疲劳性能,同时也证明了使用剪力键会增强结构的抗弯能力。研究者主要针对灌浆材料的抗压强度,灌浆段的长度等参数进行了研究,给出了参数对于灌浆连接段抗弯疲劳性能的影响。有研究者提出了抗弯承载力近似理论解,并通过试验加以验证。

但是对于灌浆连接段抗弯疲劳性能的评估仍是问题。我们很容易理解,灌浆连接段的破坏可能始于剪力键附近焊缝的破坏或者剪力键附近灌浆材料的碎裂。但是目前试验中为了达到缩尺的目的,所采用的剪力键与实际工程中并不相符。实际工程中多采用角焊缝焊接光圆钢筋的方式,而德国缩尺试验中采用的是焊珠形式的剪力键,挪威试验中采用钢板一次压模成型的方式施加剪力键,这些都需要针对性地根据实际情况加以研究。

5 结论

从直接对海油平台导管架基础经验的拿来主义,再到针对海上风电特点的创新性研究,海上风电的发展极大促进了灌浆技术的成熟。本文总结了海上风电灌浆技术在材料、灌浆工程应用、受力机理等发展,主要结论如下:

1) 灌浆连接段的疲劳问题应分成钢结构、灌浆材料以及两种材料组成的构件整体疲劳性能三部分。

2) 钢结构的疲劳问题已经比较成熟;灌浆材料的疲劳研究较少,分别考虑在海水中与空气中不同频率对灌浆材料的疲劳影响,得出一些宝贵结论;构件整体疲劳性能主要参考 DNV-OS-J101 规范,但只能用作疲劳极限状态的设计,并不能很好的预估灌浆连接段的疲劳寿命。

3) 疲劳研究主要分轴压疲劳与抗弯疲劳,轴压疲劳研究相对简单,弯曲疲劳目前主要见于丹麦 Aalborg 大学、德国劳氏船级社、挪威船级社等 3 家机构的研究成果。

4) 我国同济大学也正在开展这方面的研究,抗弯疲劳是灌浆连接段受力性能的难点与重点,轴压加弯曲的组合疲劳更是将来灌浆连接段受力性能研究的难点。

参考文献:

- [1] DNV. Fatigue design of offshore steel structures: DNVGL-RP-0005 [S]. Norway: Det Norsk Veritas, 2014.
- [2] SØRENSEN E. Fatigue life of high performance grout in dry and

- wet environment for wind turbine grouted connections [J]. Nordic Concrete Research, 2011: 1-10.
- [3] DNV. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101. [S]. Norway: Det Norsk Veritas, 2007.
- [4] DNV. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101 [S]. Norway: Det Norsk Veritas, 2014.
- [5] LOTSBERG I, BERTNES H L. Capacity of cylindrical shaped grouted connections with shear keys [R]. Hovik, Norway, 2012.
- [6] Billington C J, Tebbett I E. The basis for new design formulae for grouted jacket to pile connections [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 1980.
- [7] BOSWELL L F, MELLO C D, CITY T. The fatigue strength of grouted repaired tubular members [C]. Offshore Technology conferences. [S. l.]: [s. n.], 1986: 147-152.
- [8] LOHAUS L, ANDERS S. High-cycle fatigue of "ultra-high performance concrete" and "grouted joints" for offshore wind energy turbines [A]//Wind Energy. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 309-312.
- [9] SCHAUMANN P, WILKE F. Fatigue of grouted joint connections [C]. DEWEK. Proceedings of the 8th German Wind Energy Conference (DEWEK), 2006.
- [10] SCHAUMANN P, LOCHTE-HOLTGREVEN S, BECHTEL A. Fatigue design for prevailing axially loaded grouted connections of offshore wind turbine support structures in deeper waters [C]. Proceedings of the European Wind Energy Conference. 2010: 2047-2054.
- [11] Ingebrigtsen T, Loset, Nielsen S, et al. Fatigue design and overall safety of grouted pile sleeve connections [J]. Offshore Structures, 1990.
- [12] SCHAUMANN P, WILKE F. Design of large diameter hybrid connections grouted with high performance concrete [J]. Isope, 2007: 340-347.
- [13] ANDERSEN, M. AND PETERSEN P. Structural design of grouted connection in offshore steel monopile foundations [C]. Global Windpower Conference. 2004: 1-13.
- [14] MOLLER A. Efficient offshore wind turbine foundations [J]. Wind Engineering, 2005, 29(5): 463-469.
- [15] WILKE F. Load bearing behaviour of grouted joints subjected to predominant bending [M]. Germany: Shaker Verlag GmbH, 2014.
- [16] SCHAUMANN P, WILKE F, LOCHTE-HOLTGREVEN S. Nonlinear structural dynamics of offshore wind energy converters with grouted transition piece [J]. European Wind Energy, 2008.
- [17] SCHAUMANN P, WILKE F, LOCHTE-HOLTGREVEN S. Grout-verbindingen von monopile-gründungsstrukturen-trag-und ermüdungsverhalten [J]. Stahlbau, 2008(77): 647-658.
- [18] SCHAUMANN P, LOCHTE-HOLTGREVEN S, WILKE F. Bending tests on grouted joints for monopile support structures [J]. Dewec, 2010(5): 6-9.
- [19] SCHAUMANN P, LOCHTE-HOLTGREVEN S. Schdi-gungsmodell für hybride verbindungen in offshore-winden-ergieanlagen [J]. Stahlbau, 2011(80): 226-232.
- [20] KLOSE M, MITTELSTAEDT M, MULVE A. Grouted connections-offshore standards driven by the wind industry [C]//22th International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.