

基于ANSYS的导管架合拢焊接工艺与抗风安全分析

宋 健

上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海

收稿日期: 2026年4月8日; 录用日期: 2026年4月28日; 发布日期: 2026年5月9日

摘 要

针对海上换流站导管架在陆地立式建造合拢过程中, 上部片体吊装、主腿打底焊接阶段面临的抗风安全与焊接工艺优化问题, 提出了一种基于有限元数值模拟的评估方法。以某70多米高的导管架为例, 利用ANSYS建立了精细化模型, 通过模拟不同焊接与风载的组合工况, 分析了合拢口焊缝的应力分布。结果表明: 该导管架焊缝处等效应力随焊接量增加而显著降低。为确保脱钩安全, 6级风时焊接厚度需达到壁厚20% (14 mm)以上; 12级风时则需达到70% (49 mm)以上, 方能使焊缝应力低于材料屈服强。本研究为导管架合拢焊接工艺的制定与脱钩安全决策提供了量化的理论依据, 该方法亦具备向其他大型结构类似工况推广的潜力。

关键词

导管架, 合拢焊接, ANSYS, 风荷载, 脱钩安全

Analysis of Closure Welding Technology and Wind Resistance Safety for Jacket Structures Using ANSYS

Jian Song

Shanghai Zhenhua Heavy Industries (Group) Co., Ltd. (ZPMC), Shanghai

Received: April 8, 2026; accepted: April 28, 2026; published: May 9, 2026

Abstract

A finite element numerical simulation-based assessment method is proposed to address the issues

of wind resistance safety and welding process optimization during the onshore vertical assembly of an offshore converter station jacket structure, specifically in the stages of upper module lifting and root welding of the main legs. Taking a jacket structure over 70 meters high as an example, a refined model was established using ANSYS. By simulating combined working conditions involving different welding sequences and wind loads, the stress distribution at the closure weld was analyzed. The results show that the equivalent stress at the weld decreases significantly with increasing weld volume. To ensure hook-release safety, the weld thickness must exceed 20% of the leg wall thickness (14 mm) under wind force scale 6, and exceed 70% (49 mm) under wind force scale 12, in order to keep the weld stress lower than the material yield strength. This study provides a quantitative theoretical basis for determining the closure welding procedure and making hook-release decisions for jacket structures. The proposed method also holds potential for extension to other large-scale structures under similar working conditions.

Keywords

Jacket, Closure Welding, ANSYS, Wind Load, Hook-Release Safety

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海上风电作为开发风能资源、推动能源转型的关键技术,在我国拥有广阔的发展前景。其支撑基础——导管架结构正日趋大型化,导致海上安装船难以实施翻身作业,立式建造与运输已成为主流建造模式[1]。在此模式下,导管架在陆地上常分为上、下两大片体分别建造,最终通过龙门吊吊装上部片体进行高空合拢。在合拢口主腿进行打底焊接的过程中,焊接结构需在吊机脱钩前承受结构自重与风荷载的共同作用。因此,科学评估不同焊接进度下结构在风载下的安全性,对平衡施工安全与经济成本至关重要。

通过计算机数值模拟对导管架基础的合拢打底焊接过程进行分析,能够揭示不同风力等级与焊接进度下焊缝区域的力学响应规律,从而为优化施工工艺、保障作业安全并控制建造成本提供关键的理论依据。目前,围绕导管架结构建造与力学性能已积累了一定的研究成果。在焊接工艺方面,毛小飞等[2]针对海上风电五桩导管架的相同母材开展了焊接工艺试验,实现了车间流水线的高效节能焊接与场外总装全位置手工气体保护焊的灵活适配;夏小勇等[3]则提出了一种用于导管架基础牛腿的焊接工艺,通过在合拢正式焊接前采用电焊进行定位,有效提升了焊接效率与质量。在数值模拟方法上,侯雯峪[4]采用 ABAQUS 软件,结合理论分析了钢管混凝土基础结构在多种载荷耦合作用下的受力与变形特性,揭示了其应力、应变的分布规律;李宗豪等[5]通过分别建立梁单元与壳单元模型进行对比,指出壳单元在模拟导管架管件连接处应力状态时具有更高的精度。上述研究在建造技术与分析方法层面,均为导管架的吊装合拢提供了有益参考。然而,针对换流站导管架在合拢打底焊这一特定动态施工阶段,焊缝力学性能与风荷载的耦合影响机制尚待深入探讨。

为此,本文以实际工程为对象,采用 ANSYS 有限元软件,对导管架上部片体与下部基础的合拢焊接过程进行数值模拟。重点分析不同焊接量和风荷载对合拢口焊缝应力场的影响规律,旨在为实际工程中确定安全、经济的焊接工艺窗口与脱钩时机提供直接参考。

2. 计算模型与方法

2.1. 工程概况与计算工况

本研究对象如图 1 所示，为某海上换流站导管架，其以立式姿态建造，总高度超过 70 米。计算聚焦于上部片体的中段，其主腿为直径 2400 mm、壁厚 70 mm 的圆管。计算假定：龙门吊吊装上部片体就位后，对合拢口主腿进行由内向外的环缝打底焊；焊接进行到一定程度后，龙门吊松钩，结构重量与风荷载全部由焊缝承担。

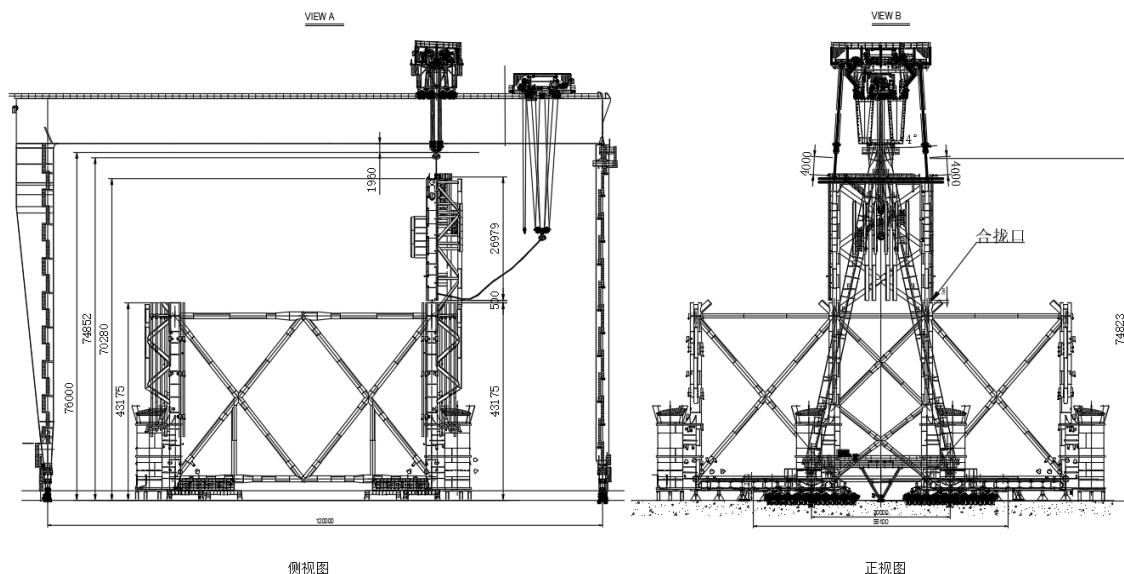


Figure 1. Schematic diagram of jacket lifting and welding
图 1. 导管架吊装焊接示意图

为评估脱钩安全，设定了以下关键变量与工况：

(1) 风荷载：考虑两类典型天气，即 6 级风(正常施工天气)和 12 级风(极端天气)。风荷载依据规范[6]计算，风荷载标准值按公式(1)进行计算，作用在导管架上部的风荷载合力如表 1 所示。

$$\omega_k = \beta_z \cdot \mu_s \cdot \mu_z \cdot \omega_0 \tag{1}$$

式中， ω_k 表示风荷载标准值； β_z 表示高度 z 处的阵风系数，地面按 A 类，高空 70.65 m， β_z 取值为 2.35； μ_s 表示风荷载的体型系数，结构自身取值为 1.3； μ_z 表示风荷载的高度变化系数，地面按 A 类，高空 70.65 m， μ_z 取 2.05； ω_0 表示基本风压(kN/m²)，6 级风时， $v_0 = 13.8$ (m/s)， $\omega_0 = 13.8^2/1600 = 0.119$ (kN/m²)，12 级风时， $v_0 = 36.9$ (m/s)， $\omega_0 = 36.9^2/1600 = 0.851$ (kN/m²)。

Table 1. Structural wind load calculation

表 1. 结构风荷载计算表

风力等级	风向	挡风面积	基本风压 (kN/m ²)	体型 系数	风压高度 变化系数	高度 z 处 的风振系数	标准风荷载 ω_k (kN/m ²)	风荷载值 (kN)
6 级	±x	580	0.119	1.3	2.05	2.35	0.745	432
6 级	±y	565	0.119	1.3	2.05	2.35	0.745	421
12 级	±x	580	0.851	1.3	2.05	2.35	5.330	3091
12 级	±y	565	0.851	1.3	2.05	2.35	5.330	3011

(2) 焊接量: 定义为打底焊的熔敷厚度, 按主腿壁厚的百分比计, 分别考虑 10% (7 mm)、20% (14 mm)、30% (21 mm)、40% (28 mm)、50% (35 mm)、60% (42 mm)、70% (49 mm)。其中, 6 级风(正常施工天气)考虑 10%~30%焊接量工况, 12 级风(极端天气)考虑 40%~70%焊接量工况。

2.2. 有限元模型建立

为提高计算效率与精度, 采用混合单元建模策略。如图 2 所示, 在焊缝合拢口上下各 500 mm 范围内, 采用尺寸为 10 mm 的实体单元(Solid185)以精确捕捉焊缝应力。上部片体主体结构采用 Shell181 壳单元模拟, 下部基础采用梁-壳耦合模型。非焊缝区主结构单元尺寸设为 300 mm。导管架主结构材料为 DH36 钢, 弹性模量 206 GPa, 泊松比 0.3, 屈服强度为 355 MPa。

约束形式则在导管架底部与龙门胎架接触处简化为固定约束。荷载取值方面, 上部片体及附属结构总重约 550 吨。根据规范[6], 自重作为有利荷载, 分项系数取 1.0, 以重力加速度形式施加于整个结构。风荷载作为不利荷载, 分项系数取 1.5。以压力的形式, 分别沿结构坐标系 X、+Y、-Y 方向施加于上部片体的迎风面。

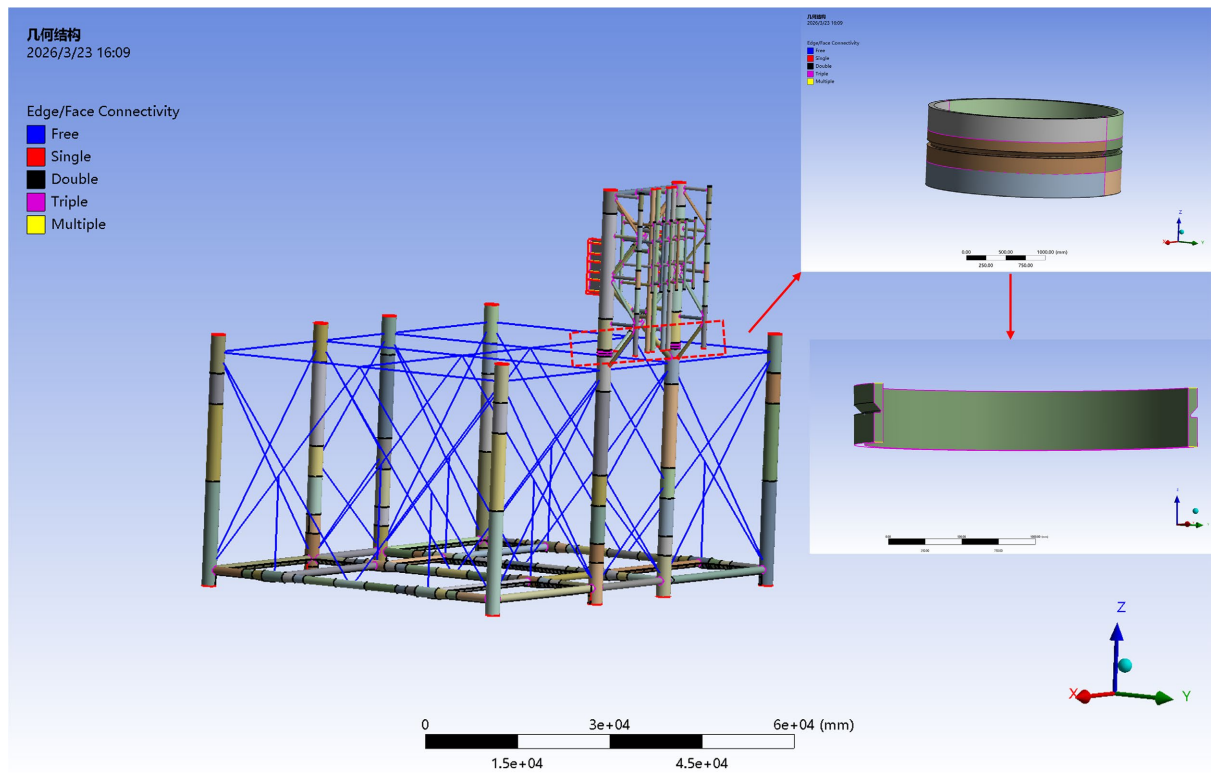


Figure 2. Finite element analysis model

图 2. 有限元分析模型

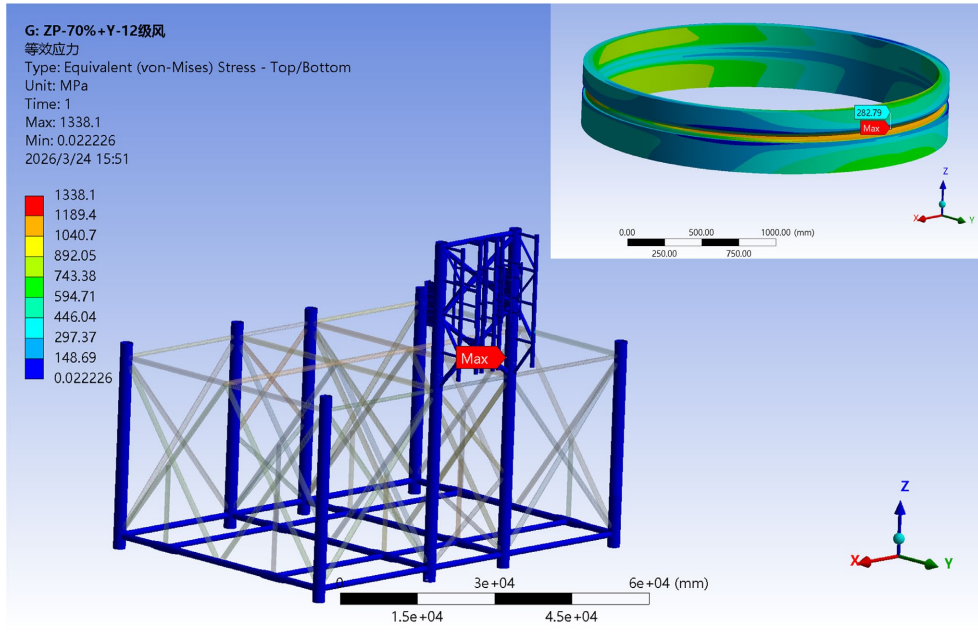
2.3. 结果后处理方法

研究分析重点关注合拢口焊缝区域在风荷载下的应力水平。为获得具有工程代表性的结果, 依据工程经验[7][8], 在结果后处理中主动剔除因几何突变引起的局部应力奇异点, 提取危险区域内具有代表性的节点应力值作为强度评判依据。针对每种风力等级, 通过对比不同风向下的焊缝应力, 确定最危险的风向, 并以该风向下的焊缝区域最大 Mises 等效应力作为该工况的评判标准。

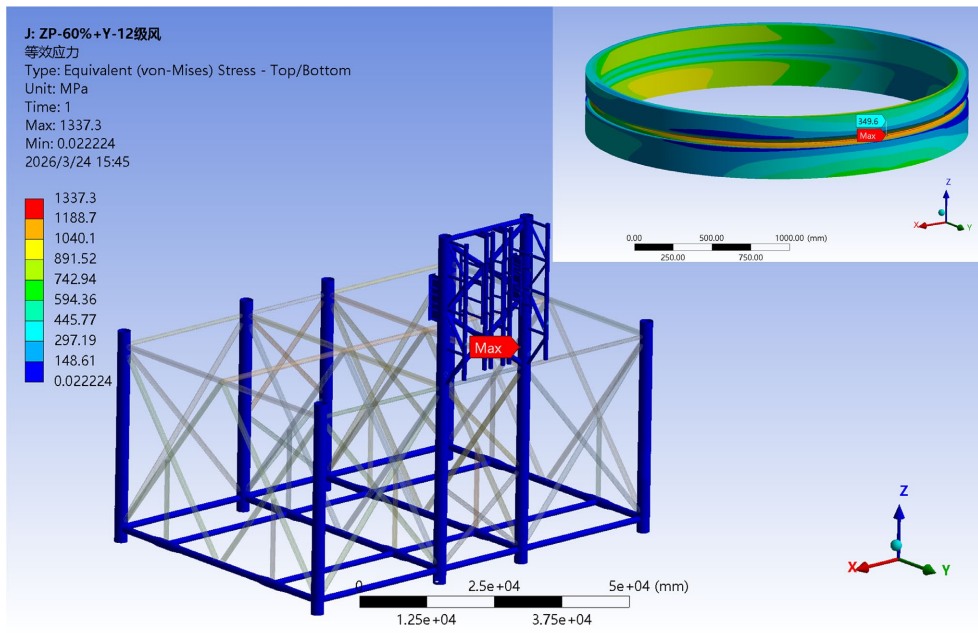
3. 计算结果分析与讨论

3.1. 最危险风向判定

为确定最危险风向工况，在6级风、焊接量为壁厚10%(7mm)的条件下，对比了+Y、-Y、+X三个风向的作用效果。图3展示了该工况下的不同风向下焊缝处的应力情况。应力计算结果表明，在+Y风向(根据模型坐标系定义)下，焊缝区域呈现的应力水平最高。因此，在后续的所有分析中，均以+Y方向风载作为该风力等级下的最危险工况进行应力评估。



a) +Y风向



b) -Y风向

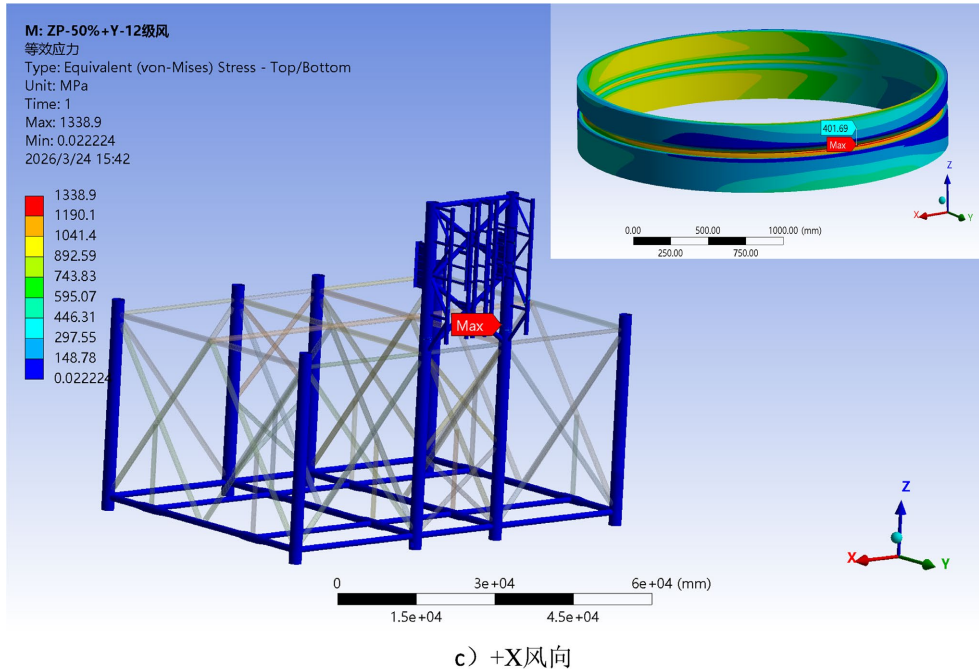


Figure 3. Stress nephogram at the weld under different wind directions
图 3. 不同风向作用下焊缝处应力云图

3.2. 焊接量与风载耦合对应力水平的影响

在确定最危险风向后，系统分析了不同焊接量下焊缝处的结构应力水平。6级风工况下，模拟了焊接量为壁厚 10%、20%、30%的情况。随着焊接厚度增加，焊缝区域的应力集中显著缓解，整体应力水平大幅下降。12级风工况下，模拟了焊接量为壁厚 40%、50%、60%、70%的情况。在极高的风荷载下，需焊接至足够厚度(70%以上)方能将应力控制在安全范围内。各工况下焊缝区域的最大 Mises 等效应力值汇总于表 2。

Table 2. Maximum equivalent stress at the weld under different wind force scales and weld volumes (unit: MPa)
表 2. 不同风力等级及焊接量下焊缝处最大等效应力值(单位: MPa)

6 级风	焊接量	10%	20%	30%	
	最大等效应力	821.76	306.03	257.43	
12 级风	焊接量	40%	50%	60%	70%
	最大等效应力	513.63	401.69	349.60	282.79

3.3. 风载关键参数对应力水平敏感性分析

为了评估风荷载参数输入对焊缝应力水平结论的可靠性，并量化风荷载参数的不确定性对脱钩决策的影响。对风荷载计算的两个关键参数：体形系数 μ_s 及阵风系数 β_z 进行敏感性分析。依据《建筑荷载规范》(GB50009-2012) [6]和类似的海上结构的工程经验，这两个参数存在一定的合理波动范围。本计算设定体形系数 μ_s 在 1.0~1.5 之间变化，阵风系数 β_z 在 2.05~2.55 之间变化。选取 6 级风工况焊接量为壁厚的 30% (21 mm)和 12 级风工况焊接量为壁厚的 70% (49 mm)进行分析，这两个工况应力水平都在 200~300 MPa 之间，小于结构的屈服强度，有较大的安全裕度，但仍对风载参数具有一定的敏感性。

同时, 采用控制变量法, 固定体形系数 μ_s 1.3、阵风系数 β_z 2.35 为基准参数组合, 通过调整改变基准组合中任意一个参数, 重新计算+Y 方向下焊缝区域的最大 Mises 等效应力, 计算结果如表 3 所示。

Table 3. Sensitivity analysis of key wind load parameters

表 3. 风载关键参数敏感性分析结果

分析工况	参数组合(μ_s, β_z)	最大等效应力值(MPa) (6 级风, 30%焊接量)	最大等效应力值(MPa) (12 级风, 70%焊接量)
基准工况	(1.3, 2.35)	257.43	282.79
改变体型系数 μ_s	(1.0, 2.35)	232.85	229.54
	(1.2, 2.35)	249.24	265.35
	(1.4, 2.35)	265.62	300.29
	(1.5, 2.35)	273.82	317.77
改变阵风系数 β_z	(1.3, 2.05)	243.68	254.00
	(1.3, 2.25)	252.75	273.21
	(1.3, 2.45)	262.11	292.43
	(1.3, 2.55)	266.50	302.04
最不利组合	(1.5, 2.55)	284.35	340.84

根据表 3 可知, 体系系数与阵风系数对焊缝应力的影响趋势一致, 且影响效果显著, 体系系数和阵风系数在 0.5 的范围内波动, 对应的应力结果最大有 80 MPa 左右的变化。同时, 单个参数在所述合理范围内单独波动时, 所选的两种工况焊缝应力均能保持在 355 MPa 的屈服强度以下, 表明在对应工况下, 选取所述的焊接量能够满足脱钩抗风需求。

3.4. 脱钩安全焊接量评估

为确保脱钩安全性决策不仅满足材料强度要求, 更符合行业安全规范, 结合《海上风力发电机组支撑结构设计》(DNVGL-ST-0126) [9]进行计算结果评估。该规范规定, 在临时施工安装阶段, 结构件的许用应力可取材料屈服强度发 0.8 倍。本计算结构材料屈服强度为 355 MPa, 故施工阶段的许用应力取为 284 MPa。评估基准工况的结果如下:

(1) 正常天气(6 级风): 当焊接厚度达到壁厚的 20% (14 mm)时, 焊缝最大等效应力为 306.03 MPa, 已低于屈服强度, 但超过了施工阶段的许用应力。继续增加焊接量至 30%, 应力进一步降低至 257.43 MPa, 此时, 应力水平低于施工阶段的许用应力, 安全裕度增大。因此, 在 6 级风条件下, 该结构完成壁厚 30% 以上的打底焊后, 即可考虑安全脱钩。

(2) 极端天气(12 级风): 当焊接厚度为壁厚的 60% (42 mm)时, 应力为 349.60 MPa, 达到屈服强度临界值且超过了施工阶段的许用应力。直至焊接厚度达到壁厚的 70% (49 mm)时, 最大等效应力降至 282.79 MPa, 满足强度要求。这表明在 12 级强风下, 该结构需完成至少 70%壁厚的打底焊接, 方可确保脱钩后结构安全。

同时, 结合风载关键参数敏感性分析结果, 若需考虑最不利组合参数组合时, 在风力较小时, 焊接壁厚的 30%即可满足脱钩要求, 但若遇强风, 焊接量大幅提升至 70%, 应力水平仍高于规范需用应力, 为完全满足规范要求, 焊接量需进一步增加, 达到 80%左右, 此时最大等效应力为 268.63 MPa, 低于施工阶段的许用应力。此结论为现场施工中根据实时气象条件动态调整焊接工艺与脱钩决策提供了明确、量化的依据。

4. 结论

(1) 本文建立了一套适用于海上大型导管架合拢过程安全评估的有限元分析方法。通过采用实体-壳-梁耦合模型,在保证计算精度的同时兼顾了效率,有效模拟了打底焊与风荷载的耦合作用。

(2) 通过参数化分析,明确了不同风力等级下确保脱钩安全所需的最小焊接量。对于所述工程案例,6级风下需焊接至壁厚的20%(14 mm),12级风下需焊接至壁厚的70%(49 mm)。这一计算结果平衡了施工安全性与经济性。

(3) 所述方法及其分析流程具有良好的工程适用性与可推广性,可为同类大型钢结构在复杂工况下的合拢施工与安全控制提供系统的评估手段与决策支持。

参考文献

- [1] 洪俊. 导管架式风电桩建造工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [2] 毛小飞, 陈锋, 羌祁民, 等. 海上风电五桩导管架焊接工艺试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(6): 108-114.
- [3] 夏小勇, 许成辰, 王军, 赵永刚, 等. 海上风电导管架基础牛腿的焊接工艺[P]. 中国专利, CN201710427673.9, 2019-04-19.
- [4] 侯雯峪. 基于钢管混凝土桩的海上风电基础受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [5] 李宗豪, 朱军, 陈伟球. 海上风电导管架陆地建造过程中的应力分析[J]. 工程设计学报, 2021, 28(2): 218-226.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] 肖亚飞, 杨晓刚. 利用 ANSYS 程序对导管架典型局部构造进行有限元分析的方法探讨[J]. 中国海上油气工程, 2002, 14(4): 16-21.
- [8] Veritas, D.N. (1989) Rules for Classification of Fixed Offshore Installations. DNV.
- [9] DNVGL-ST-0126 (2018) Support Structures for Wind Turbines. DNV GL.