

DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3158. 2025. 01. 012

渤海海域海上移动钻修井平台冬季作业风险分析

韩升¹ 李鹭² 李石宽³

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司; 2. 中国石油大港油田分公司; 3. 中国石油冀东油田公司)

摘要 利用海上移动式平台开展钻修井作业,具有风险高、作业场地受限、逃救生难度大等特殊风险,冬季施工作业环境恶劣,井控风险、海上作业风险等多类风险叠加,一直是油气田及工程技术服务企业安全环保风险管控的重点,需要进行专门的风险评估,采取针对性防控措施。开展移动式钻修井平台冬季作业安全风险评估,需要充分掌握作业海域气象环境条件、平台技术参数等基础资料,辨识冬季钻修井作业特殊性的危害因素,分析低温条件下设备设施完整性和可靠性,检查安全管理制度、操作规程等的落实情况,评估平台结构抗冰性能、设备设施维护情况及外部资源等方面的风险,明确海上移动式钻修井平台冬季作业的基本安全条件,并提供风险管控措施建议。

关键词 冰情预测; 历史冰情; 插桩就位; 强度校核; 冰激振动

中图分类号: TE358

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2025)01-0059-04

Risk Analysis of Winter Operation of Offshore Mobile Drilling and Workover Platforms in Bohai Sea Waters

Han Sheng¹ Li Ao² Li Shikuan³

(1. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology; 2. Dagang Oilfield Branch of CNPC;

3. Jidong Oilfield Company of CNPC)

ABSTRACT Drilling and workover operations are carried out using offshore mobile platforms, which has the special risks, such as high risk, limited working area, difficult to escape and rescue. The working environment is bad in winter, such as well control risk and offshore operation risk and other types of risks superimposed, which has always been focus of safety and environment risk management for oil and gas fields, engineering and technical service enterprises. It is necessary to conduct specialized risk assessment and take targeted prevention and control measures. To carry out the safety risk assessment of winter operation on drilling and workover platforms, the basic data such as the meteorological environment conditions of the operating sea area and the technical parameters of the platform need to be fully mastered. The hazard factors of the particularity of drilling and workover operations in winter need to be identified. The integrity and reliability of equipment and facilities under low temperature conditions need to be analyzed. The implementation of safety management system and operation regulations need to be checked. The ice resistance performance of platform structure, maintenance situation of equipment and facilities and external resources and other risks need to be evaluated. The basic safety conditions of winter operation on offshore mobile drilling and workover platforms need to be clarified, and suggestions on risk control measures also need to be provided.

KEYWORDS ice forecast; historical ice conditions; stake in place; strength check; ice-induced vibration

0 引言

相较于我国黄海、东海及南海海域,渤海海域部分区域受台风、风暴潮等影响较小,但受冬季冰情影

响较严重,是海上移动式钻修井平台冬季作业的潜在危害,历史上出现多次海冰推倒海上固定平台或移动平台的情况。莱州湾及黄海北部、渤海湾、辽东湾一

般一年内有1~2个月的冰封期,历史上也出现过1936,1947,1957年等重冰年,最近的2010年1月,渤海就遭遇了30年以来最严重海冰灾害。由于部分平台设计时未考虑抗冰能力的客观情况,因此,结合渤海海域环境特点和海上移动平台设备设施运行、平台插桩情况及平台设计参数,全面分析评估海冰、低温对平台结构、设备设施可能导致的穿刺倾覆、强度失效、冰激振动、低温故障等海上冬季作业主要风险,明确海上移动式钻修井平台冬季作业的基本安全条件,确保平台有效应对冬季作业风险,必要时及时撤离,具有十分重要的意义。

1 渤海海域冬季作业环境要素

开展冬季作业评估,要了解哪些环境要素对冬季作业有重要影响,掌握这些环境要素的作用规律,正确使用相关预测预报信息,才能为有效开展冬季作业风险防控提供依据和支持。环境要素包括冰情预测、历史冰情等^[1]。

1.1 冰情预测

掌握环境要素首先是要掌握每年冰情预测结果。依据国家海洋局冰情划分标准,渤海冰情划分为5个类型年:轻冰年(1级)、偏轻冰年(2级)、常冰年(3级)、偏重冰年(4级)、重冰年(5级)^[2]。国家海洋环境预报中心每年11月召开冬季海冰预测会商会,预计冰情等级,如2022—2023年冬季为2.5级(常年略偏轻),严重冰期为2023年1月至2月中旬。渤海各地区常年冰情参数见表1。

表1 渤海各地区常年冰情基本参数

海区	最大浮冰范围/ nmile	一般冰厚/ cm	最大冰厚/ cm
辽东湾	60~70	15~25	40
渤海湾	10~20	5~15	20
莱州湾	10~20	5~15	20
黄海北部	15~25	10~20	30

1.2 历史冰情

渤海从南到北,存在结冰程度逐步增加情况。渤海各地区冰期情况见表2。

据资料统计,渤海湾发生30年来同期最严重冰情,结合当时冰情预测信息及冰情的实际情况开展对比分析。2009—2010年冰情预测信息为:“2009—2010年冬季渤海及黄海北部的冰情将为偏轻冰年,冰情等级为2.0~2.5级”。据国家海洋局官方信息,

表2 渤海各地区冰期时长情况

海域名称	历史冰期时长	历史冰期时间
辽东湾	2个半月	12月中下旬至3月上旬
渤海湾	1个半月	从1月上旬至2月中旬
莱州湾	约1个月	约1个月
黄海北部	1个半月	1月上旬至2月中旬

2009—2010年冬季渤海及黄海北部的冰情实际为偏重冰年。特点是:①冰情发生早,11月下旬辽东湾出现大面积初生冰,时间较常年提前半个月左右;②发展速度快。莱州湾浮冰范围从1月9日的16 nmile迅速增至1月18日的39 nmile,24日发展至46 nmile,为莱州湾40年最大海冰范围。③浮冰范围大、冰层厚。辽东湾2月13日浮冰范围为108 nmile,最大单层冰厚50 cm。

可以看出,2009—2010年冬季渤海冰情预测偏差较大,冰情发展速度及冰层厚度均超预期,浮冰已基本覆盖渤海过半区域。当浮冰厚度超过海上钻修井平台守护船舶的抗冰能力时,平台人员将无法通过船舶撤离,且平台本身也存在被推倒的风险。因此海上移动平台冬季作业期间应建立有效的监测机制,及时掌握冰情发展趋势,保障应急准备时间。

1.3 冰情分析要点

祖子清等^[2]的《未来中国近海海冰变化特征的预估研究》表明,黄、渤海的海冰受到多种气候因素的影响,这些因素主要表现为大气环境及周围的海洋气候环境。将2 m气温增量作为未来气候变化的信号,加入历史强迫场驱动模式进行海冰的未来情景预估是合理的。李彦青等的《渤海海冰外缘线候平均离岸距离的变化及其关键影响因子》也表明,每年的海冰平均离岸距离最大值通常发生在1月和2月上旬^[3]。辽东湾海冰平均离岸距离最大值出现的时间比渤海湾和莱州湾晚,且具有发生时间越晚,该年度冬季冰情越重的特点。小的海区,如渤海湾和莱州湾的海冰对气温的响应更快。因此,温度是开展冰情预测的关键因素。

渤海三面陆地的特点也造成了长期冰情预报难以考虑突发异常天气、局部海域、近岸浅滩海域特殊情况的影响,极端天气下,冰情会在两周内迅速扩大,移动式钻修井平台作业单位应监测海冰形成的同时,关注气温的变化,应通过对比历史数据有效预判冰情发展趋势。

可对比浮冰出现的时间调整生产运行计划和应

急准备。因此在钻修井平台冬季作业期间,必须引入72 h和7 d气象预报和冰情预报,加强海冰监测,才能确保及时组织撤离。可对比预测最大浮冰的范围和钻修井坐标,分析浮冰可能的影响程度。

1.4 海冰破坏形式分析

由于对冰荷载认识不足,结构设计不合理,曾经发生过很多海洋结构被海冰破坏的事故,如:海冰推倒结构;作用于结构的周期性荷载引起沙土基础液化;冰激振动导致结构疲劳破坏或上部设施损坏。

2 结构风险分析

2.1 插桩就位风险分析

自升式钻修井平台插桩就位要满足SY/T 6707—2016《海洋井场调查规范》的要求,就位处土壤桩基承载力一般要满足1.5倍安全系数,以此判断插桩是否满足安全要求。风险分析是通过分析钻修井平台在就位时的单桩最大预压荷载(P1)、桩腿或桩端所处硬土层的最大极限承载力(P2)、桩腿或桩端所处深度以下软弱土层的最小极限承载力(P3)、单桩实际施加的预压荷载值(P4)等数据,计算无量纲穿刺相对安全系数,判断插桩是否满足安全要求。如果穿刺平台将可能发生倾覆。

插桩就位风险分析的数据来源于钻修井平台所在的海底地质调查报告、平台拖航统计表和平台操船手册,平台插桩时插桩深度与实际压载均应达到设计要求。

2.2 桩腿强度校核

桩腿强度校核一般通过建立有限元模型来进行分析结构强度。有限元模型中反映了桩腿材质、壁厚、桩腿直径、长度等信息以及风荷载、流荷载、冰荷载等环境荷载。其中环境荷载通过以下公式计算确定^[4]。

$$\text{风荷载} = (\rho/2)u^2CsA \quad (1)$$

式中: u 为风速,km/h; ρ 为空气质量密度,kg/m³;Cs为形状系数;A为结构物迎风面积,km²。

$$\text{流荷载} = C_D\rho Auc \quad (2)$$

式中: C_D 为拖曳力系数;A为单位长度圆柱垂直于流的投影面积,km²; uc 为设计海流流速,n mile/h。

$$\text{冰荷载} = mIf_c\sigma_c Dh \quad (3)$$

式中: m 为形状系数; I 为嵌入系数; f_c 为冰的抗压强度,MPa; σ_c 为冰无侧限压缩强度,MPa; D 为冰挤压结构的宽度,km; h 为冰厚,m。

通过对不同作用方向和不同作业工况条件下,风

荷载、流荷载、冰荷载的综合分析得出桩腿最大 uc 值。当 uc 值大于1 nmi/h时,则在此环境条件下不满足要求。同理得出不同工况条件下最大抗冰厚度,为钻修井平台制定环境条件监测计划及应急撤离计划提供参照。

2.3 冰激振动风险分析

冰激振动会导致冰区钻井平台、灯塔、桥墩等设施结构疲劳损伤。更严重的是,海冰导致的冰激共振会产生巨大的振动,超过设施结构和员工身体的可接受水平。

冰激振动是一个复杂的动态过程。复杂性一方面源于海冰的破坏过程,一方面是海冰和结构的非线性动态耦合。

渤海冬季,平台结构如桩腿将与冰直接作用,海上钻井平台冰激振动的特点为结构振幅大,振动频率稳定,人员的振感明显,并且可以听到海冰与结构撞击所发出的有节奏的响声。冰激振动是直立结构冰害的主要根源,给结构带来的危害最大。2000年冬季发生过因为强烈的稳态振动导致平台的井排空管的断裂,引起高压天然气的喷出事件。

对于海上钻井平台,升船高度影响平台结构固有频率及等效水平刚度。为减少冰激振动导致共振的影响,调节平台升船高度可作为平台抗冰措施之一。

另外,冰激振动会导致海上钻井平台结构疲劳破坏,特别是热点疲劳应力比较高的区域。这就要求应对这些结构进行监控,包括桩腿、围阱区、升降结构等。

2.4 低温对结构的影响分析

开展低温对移动平台结构的影响分析,首先应确定平台的设计温度。如目前大部分平台的设计最低温度为-10℃,则该平台在建造时选用相应的钢材和厚度。钢材的最低设计温度系指构件钢材等级选择时的基准温度,并假定等于日平均气温年最低值在平台设计期限内(至少20年)的平均值,该值根据平台预期作业海域的气象资料所确定。

对照CCS发布的《海上移动平台入级与建造规范》中,对构件类别和最低设计温度下的各钢材级别对应的材料厚度限制等要求,检查相关构建在所处区域最低温度下是否满足对应厚度的要求。冬季作业过程中,应加强对当日温度的监控,并设置合适的预警温度指标。针对设计最低温度为-10℃的平台,建议当日最低温度低于-10℃时,应采取平台降载、结构保温等措施尽可能降低低温条件下金属韧性的损失。当日平均温度接近或低于-10℃时,应停止作业。

3 设备设施风险分析

3.1 低温对设备的影响

平台存在诸多的水管线,如海水管线、生活用水管线、钻井水管线、消防水管线、污水管线等,在周围环境温度降低时,这些管线存在冻堵、冻裂的风险,影响平台正常组织生产和施工安全。

平台设备一般均有使用温度限制,低温主要影响设备润滑油、冷却油的正常使用,若未使用适用型号、性能的产品,将会使得设备运转异常,甚至损坏。

3.2 冰激振动对设备的影响

海冰导致的冰激振动不但直接作用于平台直接接触结构,同时会间接作用于平台设备,如振动导致设备固定螺栓松动、密封泄漏等,影响设备的正常运转;严重时,导致具备振动保护的装置触发保护,停止运转;另外,振动会造成管线、法兰等受力改变,严重时导致其损坏^[5]。

综上,冰激振动导致的管线、法兰、仪表、动设备等问题将极大增大平台可燃气体泄漏、溢油风险。因此,在加强对上述各类设备设施的日常巡检的同时,应重点关注各类仪表、管线、法兰连接等出现的振动情况,提前发现异常振动区域,并采取柔性的管道接头等防振措施。

3.3 设备管理冬季作业风险

平台关键设备设施完整性、冬季作业管理规范性、冬季设备安全管理情况等是影响冬季作业安全的重要因素。

钻井系统、辅助系统、公用系统、安全系统等设备设施在低温环境下如未根据平台设备设施技术资料,采取针对性的维护措施和防冻保温措施,未及时排除故障及隐患,可能导致设备设施运转异常,冬季作业风险增大。

目前移动钻修井平台上的绞车、顶驱、转盘、钻井泵、固井泵、升降系统、吊机等主要设备设施的技术资料均未明确其最低工作环境温度,但根据多数平台冬季专业的经验,在正确使用低温润滑油、柴油等油品,

按要求启动、操作时,均可以在低于 -10°C 的低温下正常运行。但防喷器控制器设计运行温度范围一般为 $-13\sim 40^{\circ}\text{C}$,当冬季作业期间温度低于 -13°C 时防喷器液压控制管线存在一定故障风险,需采取专门的防冻措施。

4 结 论

本文从渤海海域冬季环境条件和海上移动式平台设施特点两条主线出发,对海上移动式钻修井平台冬季作业风险进行了系统分析,阐明了海冰、低温对平台结构、设备设施可能导致的穿刺倾覆、强度失效、冰激振动、低温故障等海上冬季作业特有风险,分析了渤海海域冬季环境特点,以及环境因素的影响方式。海上移动平台管理单位针对上述风险开展冬季风险防控,强化海冰、气温等环境因素的监测和设备设施东防保温管理。如平台冬季作业风险分析的结果为采取措施后可进行作业,海上移动平台管理单位应严格落实相关措施。如部分平台受设计能力限制经分析无法开展冬季作业,应在冬季冰期前组织撤离。此外,移动平台一旦受困于海冰中将难以有效撤离,因此要强化守护船舶、拖船等应急资源的调配,在冰情恶化前及时组织撤离。

参 考 文 献

- [1] 孙明,袁本坤,黎舸,等. 胜利油田作业海域冰情特征及减灾对策[J]. 海洋开发与管理,2017,34(5):98-102.
- [2] 祖子清,凌铁军,张蕴斐,等. 未来中国近海海冰变化特征的预估研究[J]. 海洋预报,2016,33(5):1-8.
- [3] 李彦青,苏洁,汪洋,等. 渤海海冰外缘线候平均离岸距离的变化及其关键影响因子[J]. 2013,43(7):7-16.
- [4] 张大勇,刘笛,许宁,等. 冰激直立腿海洋平台疲劳寿命分析[J]. 海洋工程,33(4):35-44.
- [5] 张曙光. 海上移动式平台管理现状及安全风险辨识[J]. 中国航海,2023(31):113-115.

(修回日期 2024-07-03)

(录用日期 2024-09-05)

(编辑 王蕊)