

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2026.01.007

轻型水下生产系统结构保护强度设计

付殿福¹, 李睿², 王晓蕾¹, 高志浩²

(1. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心, 北京 100028; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要:近年来,海上油气开采技术取得了显著进展,水下生产系统成为深海油气资源开发的关键。然而,随着海洋油气资源开发活动加剧,水下生产系统面临船舶冲击破坏的风险日益增加。因此,科学设计水下生产系统的防护结构,对于有效防范船舶冲击所引发的经济损失和海洋环境污染,具有重要的工程价值与现实意义。本文采用数值模拟方法研究落物、落锚、拖网板对三种不同结构复合材料防护装置的冲击响应,并从铺层厚度与倾斜角度两方面对复合材料保护装置性能进行优化,探究了两种参数对复合材料层合板力学性能的影响规律,优选了最合理的参数设计。研究表明:随着物体冲击速度的增加,受冲击表面达到最大凹陷深度的时间逐渐变短,同时达到的最大凹陷深度也越大;随着防护装置厚度的增加,三种防护装置达到最大撞击响应的时刻逐步提前,凹陷深度逐步减小;不同防护装置的防护效果与侧边倾斜角度相关,可通过改变侧边倾角来提升防护效果。研究结果可为轻型水下生产防护系统设计提供有益参考。

关键词:水下生产防护系统;复合材料;冲击响应;结构优化

中图分类号: TE58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2026) 01-0057-08

石油和天然气作为重要的能源与化工原料,对各个国家都具有重要的战略意义,深刻影响着经济发展、政策实施和社会稳定。随着世界经济飞速发展,能源短缺问题日益严峻,传统的陆地油气资源供给无法满足各行业的需求,油气资源的勘探与开发也从陆地走向了海洋^[1]。水下生产系统作为开发海洋油气资源的主要途径,在海洋油气开发和生产中占据举足轻重的地位,一旦发生破坏,将会造成不可估量的经济损失和环境污染^[2],因此,新型水下生产系统防护装置设计受到了各国石油公司的广泛关注。目前,水下生产系统的关键技术被挪威、美国、巴西等国掌握。与国外相比,我国海洋油气开发起步较晚,技术尚有差距,因此,国内水下生产系统建设仍需进一步加强。

水下生产系统在运行过程中往往面临着一定风险,据统计,全球海底输送管道破裂事故的50%~60%

是由第三方破坏引起的^[3],2000—2012年,国内公开报道的海底管道泄漏事故有19起,其中7起是由第三方破坏引起的,占比36.8%。因此,第三方破坏是造成水下生产系统损坏的重要原因之一,第三方破坏产生的原因主要有:近海工程施工、不法分子盗油、船舶起抛锚作业、海上落物冲击、拖网捕鱼和海洋开发等。随着海洋油气开发的快速发展,对复合材料防护结构的需求将呈现爆发式增长。国内外的机构和学者对复合材料防护装置进行研究分析。石锦坤等^[4]详细介绍了复合材料防护结构在海洋工程中的应用现状,并与水泥压块等传统防护措施进行了对比。安维峥等^[5]采用模型试验和数值模拟相结合的方法分析了海底生产系统防护装置顶盖受落锚冲击时的动力响应。白冰等^[6]通过进行渔网拖挂试验和水下冲击试验验证了一种玻璃纤维复合材料保护罩的可行性。YAN S W等^[7]分析

收稿日期: 2025-03-29

基金项目: 国家能源开放基金资助项目 (CCL2023RCPS0232RON)

作者简介: 付殿福 (1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事海洋平台结构设计研究。E-mail: fudf@cnooc.com.cn

了从平台或供应船掉落的物体对海底管道造成的潜在损伤,并提出了一种简便实用的方法用于研究冲击荷载对管道损伤的影响。杨秀娟等^[8-9]考虑坠落后与海水的相互作用,通过改变落物配重和物体碰撞角度来简化水的作用,分别对不同撞击因素对管道碰撞的影响进行分析。刘学涛等^[10]通过构建锚和锚链撞击海底管道的概率模型来评估锚泊作业的风险性。周沛林等^[11]根据《Risk Assessment of Pipeline Protection》(DNV-RP-F107)规范中的能量法评估了两种落锚实例中海底管道的损伤情况。

在当前的学术研究中,针对水下结构物防护装置的全面分析系统尚未构建完善,导致可供直接参考的高质量学术文献相对稀缺。鉴于此,本文在参考直接相关文献的同时,也借鉴了与海底管道等相似撞击模型的研究,以期从更广泛的视角为水下结构物防护装置的研究提供有价值的参考。

本文采用数值模拟方法研究了落物、落锚、拖网板分别在五种速度下,对三种不同防护装置的冲击响应影响,并对影响防护装置的铺层厚度和侧边倾斜角度参数进行敏感性分析,探究两种参数对防护性能的影响,优化防护装置结构。

1 材料比选与有限元模型

1.1 材料比选

目前,常用的复合材料有碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)、玻璃纤维复合材料(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)和玄武岩纤维复合材料(Basalt Fiber Reinforced Plastic, BFRP)。BFRP对碱度非常敏感,不适用于海水弱碱性环境;CFRP在高温条件下抗老化性能更加出色,但在海水常见温度下,GFRP的老化程度也较低;CFRP和BFRP成本均高于GFRP,GFRP性价比较高。综合以上分析,选择玻璃纤维复合材料作为轻型水下管汇基盘系统防护结构主材,玻璃纤维复合材料属性如表1所示。

1.2 有限元模型

为探究保护装置在碰撞过程中的冲击响应,将

落物形状简化为球形,并将冲击模型设置为刚体。根据实际工程情况,落物与拖网板质量设置为1 t,霍尔锚型号为1.14 t B型,尺寸参考《霍尔锚》(GB/T 546—2016)。三种冲击模型如图1所示,具体参数如表2和表3所示。

表1 玻璃纤维复合材料层合板材料属性

参数名称	数值	参数名称	数值
密度	1 950 kg/m ³	拉应力(纤维方向)	324 MPa
材料1方向杨氏模量	21 600 MPa	压应力(纤维方向)	192 MPa
材料2方向杨氏模量	6 690 MPa	拉应力(传递方向)	8.15 MPa
材料12方向泊松比	0.121	压应力(传递方向)	360 MPa
材料12方向剪切模量	2 932 MPa	剪切强度	38 MPa
材料13方向剪切模量	2 932 MPa	交叉项系数	0
材料23方向剪切模量	241 MPa	应力极限	0 MPa

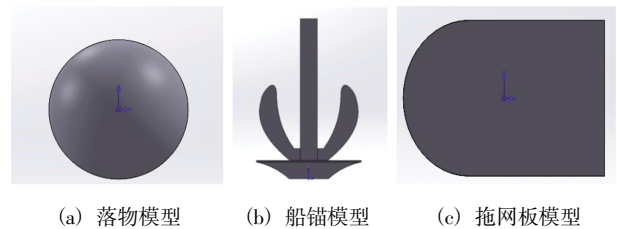


图1 三种冲击模型

表2 落物模型具体参数

半径/mm	质量/t	弹性模量/MPa	泊松比
500	1.0	200 000	0.3

表3 拖网板具体参数

长×宽/(m·m)	厚度/mm	导角半径/m	弹性模量/MPa	泊松比
4×2.6	55	1.3	200 000	0.3

水下生产系统防护结构的形状会对落物、落锚、拖网板冲击载荷响应结果产生影响,对三种典型且普遍的结构进行建模分析(模型a为九面体型、模型b为五面体加支柱型、模型c为圆柱型),具体模型如图2所示。根据《Subsea Production Systems》(U-001)^[12]规范要求,防护装置模型与水平方向的夹角应小于58°,不同倾斜角度防护装置的几何参数如表4、表5和表6所示。

1.3 模型有效性与网格无关性验证

IMKH等^[13]进行了CFRP复合材料落物冲击载荷下铺层顺序冲击特性试验。建立与图3实验参数一致的有限元模型,设置相同的边界条件。冲击器质量为0.84 kg,长度600 mm,直径10 mm;试样尺寸为200 mm×200 mm×2.5 mm(宽×长×高),

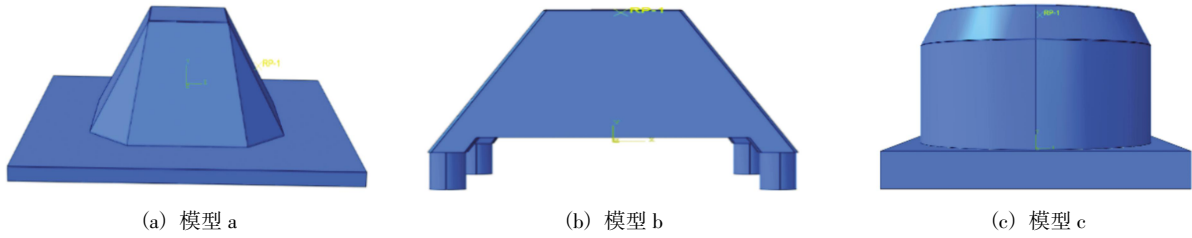


图 2 三种不同防护装置模型

表 4 模型 a 不同倾角部件尺寸

编号	倾角/°	上沿长度/m	下沿长度/m	高度/m	海床土体(长×宽)/(m·m)	海床土体高度/m
1	58	3.45	5.05/2.40	4	14×14	0.5
2	53	3.45	5.05/3.11	4	14×14	0.5
3	45	3.45	5.45/4.24	4	14×14	0.5
4	40	3.45	6.39/4.67	4	14×14	0.5

表 5 模型 b 不同倾角部件尺寸

编号	倾角/°	上沿长度/m	下沿长度/m	高度/m	支撑柱半径/mm	支撑柱高度/m	海床土体(长×宽)/(m·m)	海床土体高度/m
1	58	4.0	5.0	8.0	500	2.0	14×14	3.0
2	53	4.0	6.0	8.0	500	2.0	18×18	3.0
3	45	4.0	8.0	8.0	500	2.0	24×24	3.0
4	40	4.0	9.5	8.0	500	2.0	26×26	3.0

表 6 模型 c 部件尺寸

编号	半径/m	高度/m	切割面长/m	切割面宽/m	海床土体(长×宽)/(m·m)	海床土体高度/m
1	7.00	8.00	1.00	2.00	16×16	2.00

铺层角度为 0°/90°, 表面纤维方向与 0°方向一致。在相同冲击能量条件下, 通过对比模拟与试验的吸收能量, 验证有限元模型的准确性。图 4 展示了有限元模型预测的吸收能量和冲击能量与试验结果之间的对比, 有限元计算结果与文献试验结果具有较好的吻合度, 最大误差不超过 10%。

选取船锚下落冲击防护装置开展网格无关性验证, 船锚下落速度为 6 m/s, 统一选取 58°倾角的防护装置作为验证模型。设三种防护装置的近似全局尺寸分别为 100 mm、125 mm、150 mm、175 mm、200 mm, 对防护结构所受 Mises 应力进行了对比,

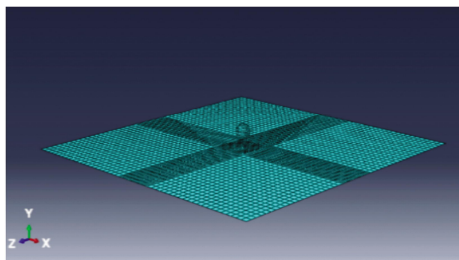


图 3 有效性验证模型

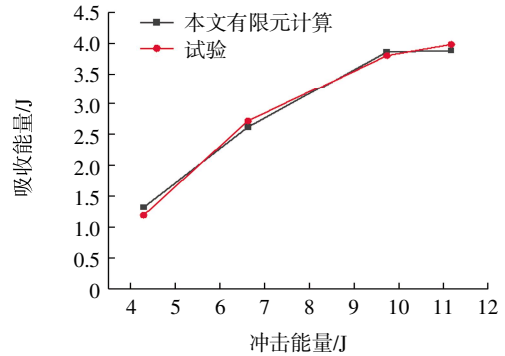


图 4 有限元计算与实验结果对比

结果如图 5 所示。

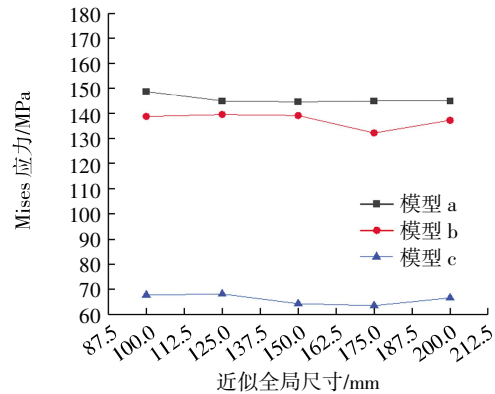


图 5 有限元计算结果对比

结果显示, 三个模型五次仿真计算的误差均在 10%以内, 本次防护装置网格划分精度满足计算要求, 综合计算时间、精度及效率等情况, 选取近似全局尺寸 150 mm 作为本次模型的网格尺寸。

2 防护装置防护性研究及分析

2.1 防护装置受冲击过程设置

分析时间设置为 0.1 s。为保证落物、落锚及拖网板具有充足的冲击时间, 落物和落锚冲击位置选取在防护装置正中心上方, 初始位置为正上方 20 mm 处, 拖网板则是在冲击侧面中心位置处且初始位置距离防护装置 20 mm。以 a 模型为例具体情况如图 6 所示。

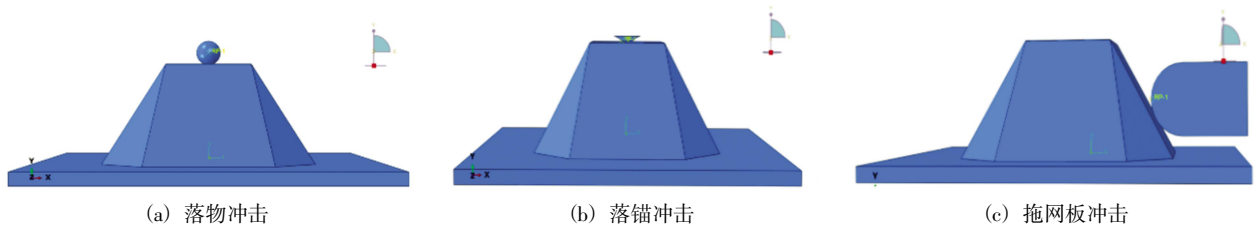


图6 冲击位置选取

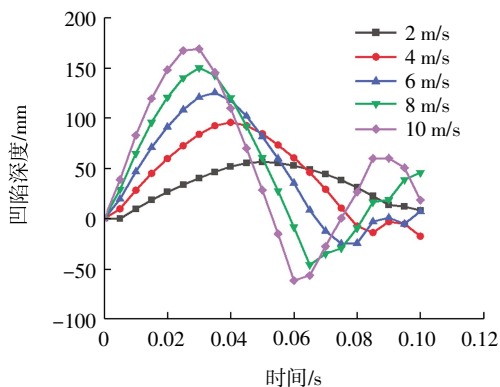
保护装置底部（主面）与海床土壤顶部表面（从面）之间设置为面与面接触对，切向摩擦系数为0.3、法向为硬接触。同时对冲击物体进行刚体约束，使在冲击时主要由防护装置发生形变。对海床土壤底部和四周进行垂直于面方向上的位移进行约束，同时对防护装置两端轴向方向位移、水平垂直轴向方向位移进行约束，对冲击物体设置速度预定义场，使其以固定初始速度冲击防护装置。根据规范《Risk Assessment of Pipeline Protection》（DNV-RP-F107）保守计算得出，船锚触底速度为6.0 m/s，本节内容以此为基础设计后续模拟工况速度取值，进行不同冲击速度（2.0~10.0 m/s）工况的有限元模拟计算。

2.2 落物速度对防护装置的影响

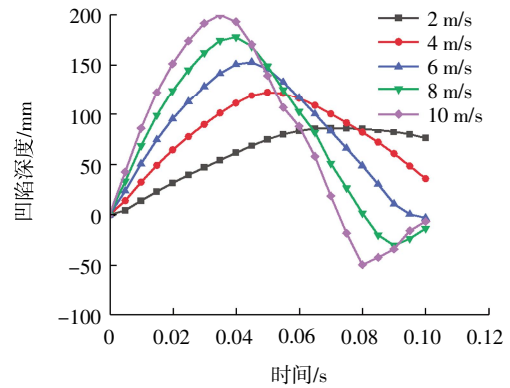
对三种防护装置受冲击表面最大凹陷深度进行分析。下落物体速度分别设为2.0 m/s、4.0 m/s、6.0 m/s、8.0 m/s、10.0 m/s，三种总体厚度为40 mm的防护装置在以上5个不同速度下受冲击表面冲击处凹陷深度随时间变化如图7所示。

从图7可以看出，随着下落物体速度的增加，模型a和模型b凹陷深度随时间先达到峰值后逐渐减小，长时间后趋于一个较低凹陷状态；而模型c凹陷深度则是随时间逐渐增加。

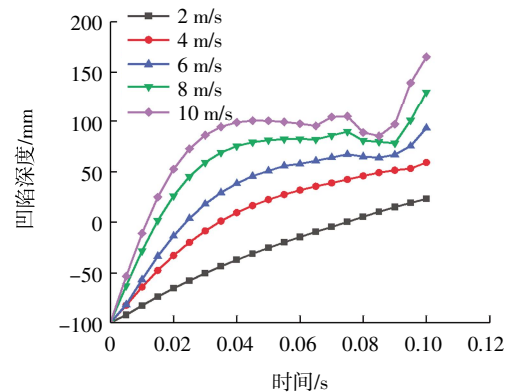
由图8可知，模型a、模型b曲线的斜率有逐渐减小的趋势，表明随着下落物体速度的增加凹陷



(a) 模型 a



(b) 模型 b



(c) 模型 c

图7 模型受落物冲击凹陷深度时程图

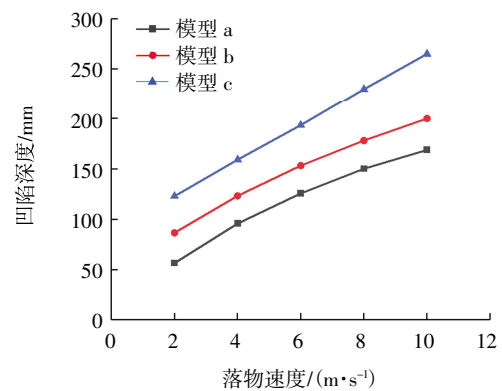


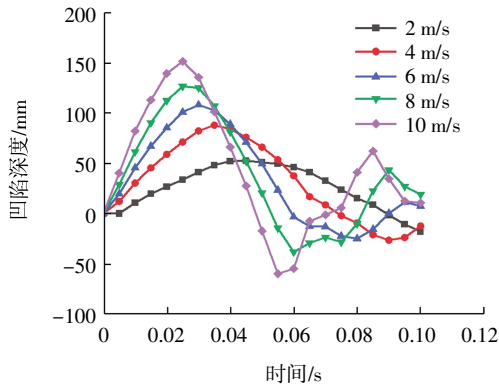
图8 落物速度与凹陷深度关系

深度的增加逐渐变慢，而模型c的曲线为一条斜率几乎不变的直线，表明该模型凹陷深度随着拖网板速度的增加线性增加。由此可见，相比模型b和模

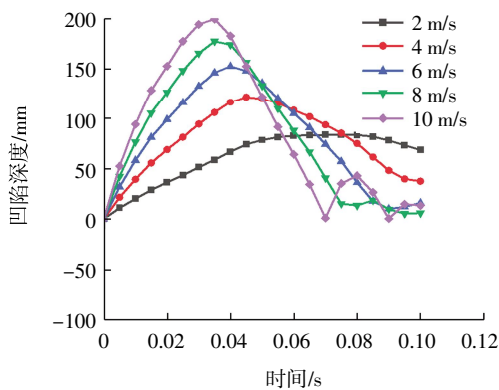
型 c, 模型 a 对落物的防护效果更加优异。

2.3 落锚速度对防护装置的影响

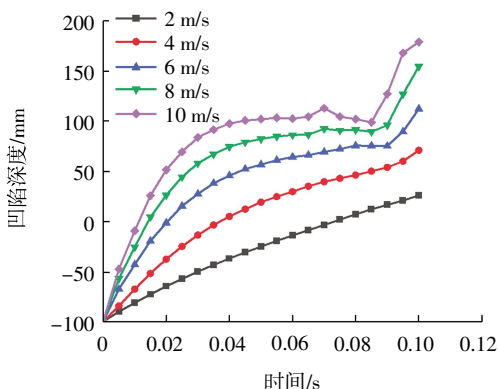
下落船锚速度分别设置为 2.0 m/s、4.0 m/s、6.0 m/s、8.0 m/s、10.0 m/s, 三种总体厚度为 40 mm 的防护装置在以上 5 个不同速度下受冲击表面凹陷深度随时间变化图如图 9 所示, 模拟冲击的霍尔锚质量为 1.14 t。



(a) 模型 a



(b) 模型 b



(c) 模型 c

图 9 模型受落锚冲击凹陷深度时程图

从图 9 可以看出, 随着下落物体速度的增加, 受冲击表面达到最大凹陷深度的时间逐渐变短, 同时达到的最大凹陷深度也越大。

由图 10 可知, 对于模型 a、模型 b 而言, 图中曲线的斜率有逐渐减小的趋势, 可以表明随着下落物体速度的增加凹陷深度的增加逐渐变慢, 而模型 c 在图 10 中的曲线在 8 m/s 后才逐渐有下落趋势, 表明该模型凹陷深度随着落锚速度的增加其凹陷深度变化较大。由此可见, 相比模型 b 和模型 c, 模型 a 对落物的防护效果更加优异。

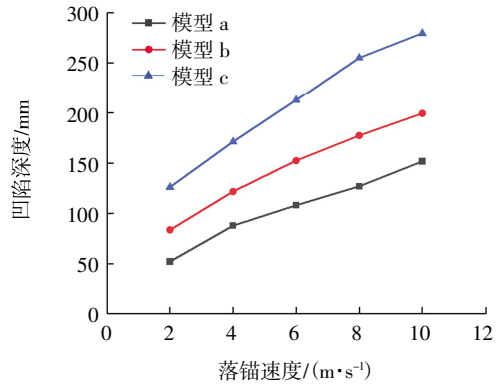


图 10 落锚速度与凹陷深度关系

2.4 拖网板速度对防护装置的影响

拖网板速度分别设为 2.0 m/s、4.0 m/s、6.0 m/s、8.0 m/s、10.0 m/s, 三种总体厚度为 40 mm 的防护装置在以上 5 个不同速度下, 受冲击表面冲击处凹陷深度随时间变化如图 11 所示, 模拟冲击拖网板质量为 1 t。

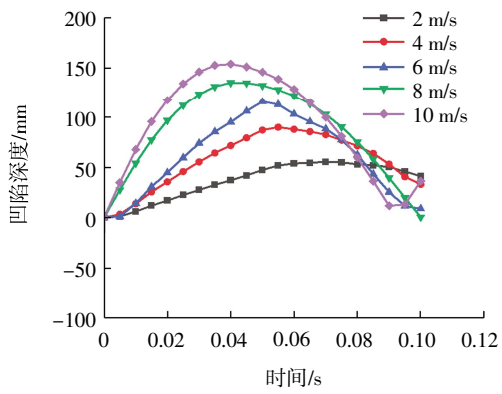
从图 11 可以看出, 随着拖网板速度的增加, 受冲击表面达到最大凹陷深度的时间逐渐变短, 同时达到的最大凹陷深度也越大。

由图 12 可知, 对于模型 a、模型 b 而言, 图中曲线的斜率是逐渐减小的过程, 可以表明随着拖网板速度的增加凹陷深度的增加逐渐变慢, 而模型 c 在图 12 中的曲线为一条斜率几乎不变的直线, 表明该模型凹陷深度随着拖网板速度的增加线性增加。由此可见, 相比模型 b 和模型 c, 模型 a 对拖网板的防护效果更加优异。

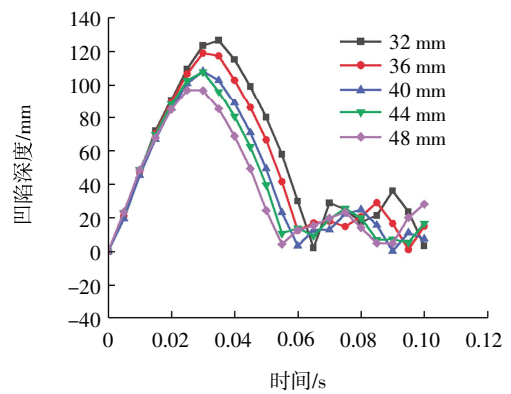
2.5 厚度对防护装置的影响

设置下落船锚速度为 6 m/s, 测试改变不同防护装置厚度对其保护效果的影响。设置防护装置厚度分别为 32 mm、36 mm、40 mm、44 mm、48 mm, 共设计 15 种不同工况对其进行研究, 计算结果如图 13 和图 14 所示。

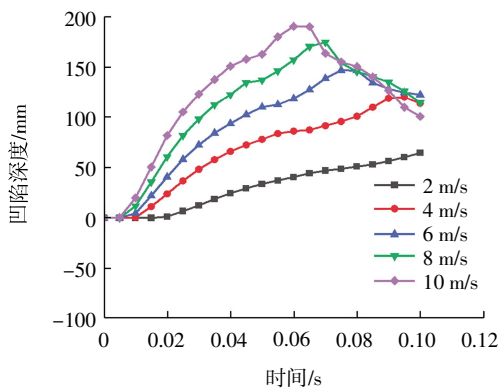
从图 13 可以看出, 随着防护装置厚度的增加, 三种防护装置达到最大撞击响应的时刻逐步提前,



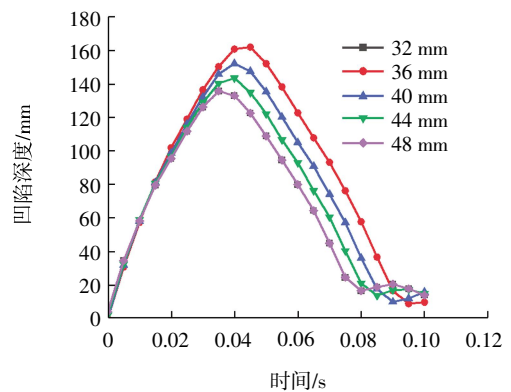
(a) 模型 a



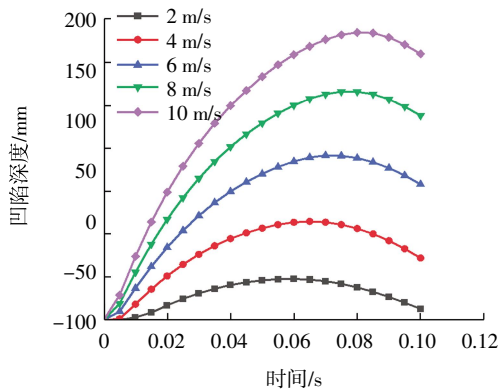
(a) 模型 a



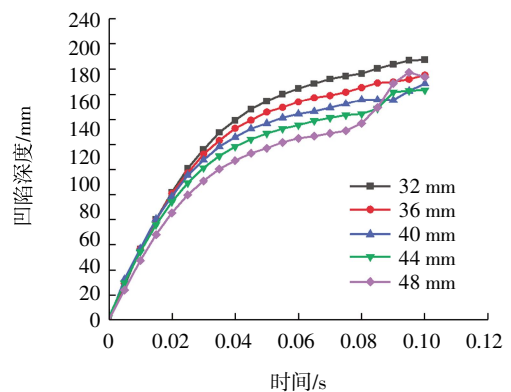
(b) 模型 b



(b) 模型 b



(c) 模型 c



(c) 模型 c

图 11 模型受拖网板冲击凹陷深度时程图

图 13 模型厚度与凹陷深度时程图

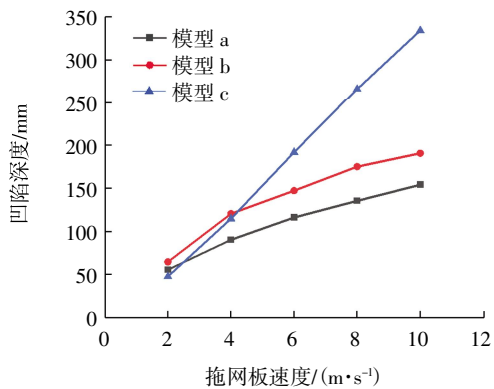


图 12 拖网板速度与凹陷深度关系

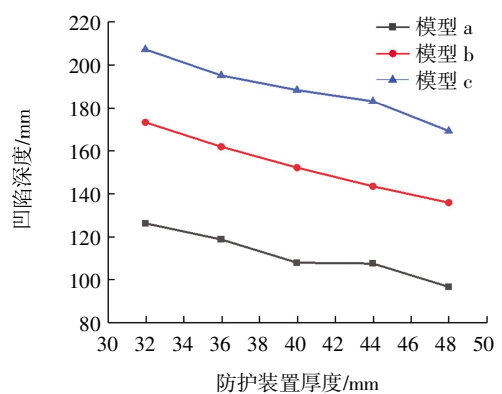


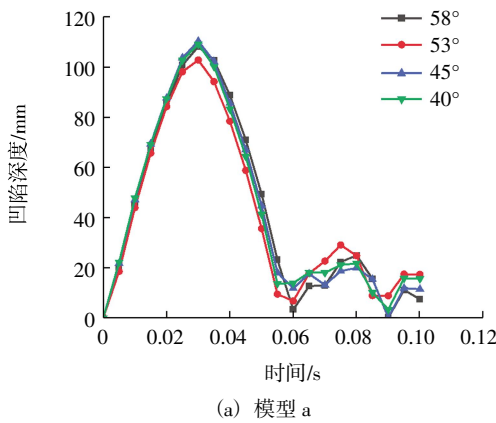
图 14 模型厚度与凹陷深度关系

并且随着厚度的增加, 三种防护装置的凹陷深度逐步减小。

从图 14 凹陷深度随厚度的变化曲线可以看出, 模型 b、模型 c 对厚度因素较为敏感, 可以通过改变厚度的方式来增加防护装置的保护效果。模型 a 在 40~44 mm 厚度存在一个平滑阶段。此外, 当厚度为 40 mm 时, 三种模型的防护效果相比更薄时已有显著提升, 但继续增厚至 48 mm 带来的提升效果有限。综合考虑防护性能与生产成本, 推荐防护装置的厚度均取为 40 mm。

2.6 侧边倾斜角度对防护装置的影响

设置下落船锚速度为 6 m/s, 研究模型 a、模型



b 倾角变化对其保护效果的影响 (模型 c 为圆柱型无法改变侧边倾角)。设置模型 a、模型 b 侧边倾角为 58°、53°、45°、40°, 共设计 8 种不同工况对其进行研究。

从图 15 可以看出, 在落锚速度为 6 m/s 的情况下, 模型 a 在侧边倾角为 58°、45°、40° 时的保护效果无明显区别, 而 53° 工况时凹陷深度最小。对于模型 b 而言, 随着侧边倾角的减小, 总体呈现防护效果优化的趋势, 但是在侧边倾角为 53°、45°、40° 时, 防护效果并没有太大区别。考虑到防护装置侧边倾角的增大将导致生产成本上升, 最终, 模型 a 和模型 b 的侧边倾角均选取 53°。

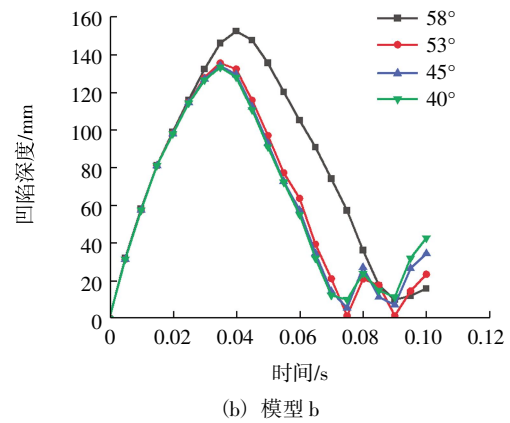


图 15 模型侧边倾角与凹陷深度时程图

3 结 论

本文构建了三种不同形式的三维有限元防护装置模型, 研究了不同落物速度、落锚速度、拖网板速度、防护装置厚度及侧边倾斜角度对防护装置保护效果的影响, 主要研究结论如下。

(1) 在落物、落锚与拖网板三类冲击工况下, 九面体结构表现出最佳防护性能, 五面体加支柱结构次之, 圆柱型结构最差。冲击速度越高, 响应时间越短。九面体结构冲击后具有明显回弹特征, 表

明其具备更优的能量吸收与缓冲能力。

(2) 在厚度变化分析中, 五面体加支柱结构与圆柱形结构在 32~44 mm 范围内, 防护性能随厚度增加持续增强; 而九面体结构在 40~44 mm 之间防护效果提升幅度趋缓。

(3) 侧边倾角对性能影响的研究表明, 九面体结构在侧边倾角为 40°、45° 与 58° 时差异不明显, 倾角为 53° 时凹陷深度最小, 局部结构稳定性更佳。五面体加支柱结构整体呈现倾角减小时, 防护能力增强的趋势, 但在 40°~53° 之间差异有限。

参考文献:

- [1] 陈荣旗, 雷震名. 中国海底管道工程技术发展与展望[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 667-672.
- [2] 尹燕波. 水下生产系统应用及管理[J]. 化学工程与装备, 2021, 12: 100-101.
- [3] 陈雪锋. 天然气长输管道定量风险评估方法及其应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [4] 石锦坤, 刘辉, 张西伟, 等. 复合材料水下防护结构在海洋油气开发的应用[J]. 复合材料科学与工程, 2021, 12: 78-

- 81, 128.
- [5] 安维崢, 范晓亮, 王栋, 等. 船舶抛锚冲击海底生产系统防护装置的研究[J]. 土工基础, 2023, 37(1): 78–82, 87.
- [6] 白冰, 罗超, 亢冬春, 等. 新型水下结构保护罩在南海典型油气开发区域应用的可行性研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(3): 190–194.
- [7] YAN S W, TIAN Y H. Analysis of pipeline damage to impact load by dropped objects[J]. Transactions of Tianjin University, 2006, S1: 138–141.
- [8] 杨秀娟, 修宗祥, 闫相祯, 等. 海底管道受坠物撞击的三维仿真研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 47–50.
- [9] 杨秀娟, 闫涛, 修宗祥, 等. 海底管道受坠物撞击时的弹塑性有限元分析[J]. 工程力学, 2011, 28(6): 189–194.
- [10] 刘学涛, 张磊, 郭振邦, 等. 锚泊作业对海底管道撞击概率的研究[J]. 振动与冲击, 2005, 6: 30–33.
- [11] 周沛林, 周宏. 抛锚对海底管道的碰撞损害[J]. 中国海洋平台, 2017, 32(4): 97–100.
- [12] NORSOK. Subsea production systems: U-001[S]. Oslo: The Norwegian Oil Industry Association, 2002: 6.
- [13] IM K H, PARK N S, KIM Y N, et al. A study on impact characteristics of the stacking sequences in CFRP composites subjected to falling-weight impact loading[J]. International Journal of Automotive Technology, 2003, 4(4), 203–211.

Design of Structural Protection Strength for Light Subsea Production Systems

FU Dianfu¹, LI Rui², WANG Xiaolei¹, GAO Zhihao²

(1. China National Offshore Oil Research Institute Ltd., Beijing 100028, China; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: In recent years, significant advances have been made in offshore oil and gas extraction technologies, with subsea production systems becoming a key component in the development of deepwater oil and gas resources. However, as offshore resource exploitation intensifies, subsea systems are increasingly exposed to the risk of impact damage from vessels. Therefore, the scientific design of protective structures for subsea production systems is of great engineering and practical significance for effectively mitigating economic losses and preventing marine environmental pollution. This study employs numerical simulation methods to investigate the impact responses of three types of composite protective structures subjected to dropped objects, anchor impacts, and trawl board collisions. The performance of the composite protective structures is optimized with respect to two key design parameters: laminate thickness and sidewall inclination angle. The influence laws of these parameters on the mechanical behavior of composite laminates are analyzed, and the most effective parameter configuration is identified. The results show that: As the impact velocity increases, the time required for the impacted surface to reach its maximum indentation depth decreases, while the peak indentation depth increases; With increasing thickness of the protective structures, the time to reach peak impact response becomes shorter, and the maximum indentation depth reduces accordingly for all three configurations; The protective effectiveness of different designs is sensitive to the inclination angle of the sidewalls, which can be adjusted to enhance overall impact resistance. These findings provide a valuable reference for the design of lightweight protective systems for subsea production facilities.

Keywords: subsea production protection system; composite materials; impact response; structural optimization