



基于模型实验的自升式网箱的水动力性能

李亚婕^{1,2}, 石建高^{2*}, 徐俊杰^{1,2}, 张凤仪^{1,2}, 吕昌麟^{1,2},
王淑婷^{2,3}, 张文阳², 张健¹, 冯晓军⁴

- (1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
3. 上海理工大学材料与化学学院, 上海 200093;
4. 广东省海洋投资发展有限公司, 广东 湛江 527499)

摘要: 为探究影响自升式网箱水动力因素, 优化与改进网箱结构, 减少极端作业环境下养殖鱼类损耗、提升网箱系统安全, 本实验开展了自升式网箱及其配套支撑系统的水动力性能研究。通过物理模型实验探究了不同流速、不同迎流角度、不同下潜深度以及安装不同类型网衣等因素对钢结构自升式网箱受力的影响。结果显示, 在网目尺寸、下潜深度与迎流角度相同时, 自升式网箱整体受力与水流速度呈正相关性, 网箱整体与水流方向垂直时, 网箱的受力最小, 且网箱迎流角度在 30°~60°时可能会受到最大的冲击力; 模型网箱在距水底 50 cm 时的受力大于网箱距水底 80 cm 时的受力; UHMWPE 网衣受力比相同线面积的 PET 网衣更大。研究表明, 在网箱设计时可以优先选择六角形网目 PET 网衣, 而附着物可使得网衣的受力增加至原来的 10 倍以上, 建议在网箱结构设计时要充分考虑附着物对网箱结构强度的影响。本研究可对自升式网箱的设计、布置及网衣选择提供参考。自升式网箱作为一种深远海养殖装备, 其前景非常广阔, 但相关工作任重道远。

关键词: 深远海养殖; 自升式网箱; 水动力; 模型实验; UHMWPE 网衣; 六角形网目 PET 网衣; 附着物

中图分类号: S 969

文献标志码: A

随着近岸养殖空间的压缩以及养殖环境的恶化, 海洋捕捞所能供应的水产品已经远无法满足人类对水产品的需求量^[1]。深远海养殖已经成为中国乃至世界海水鱼类养殖的一个重要发展方向^[2-7]。根据全国渔业经济统计公报^[8]发布的数据, 我国水产品养殖总量在我国水产品总产量中的比例, 在 2011 年约为 71.8%, 而在 2021 年这一数据已经增长至 80.6%。造成这一数据增长的主要原因包括养殖环境恶化, 沿岸工程以及过度捕捞等^[2]。我国水产养殖业因此前景广阔。深远海网

箱养殖一般放置于远离陆地, 海域开阔的地方, 风浪较大, 因此, 深远海网箱设施需要更高要求。而在远离海岸的深远海区域进行规模化养殖, 不可避免的会受到台风、赤潮等因素的影响, 较为常见的浮式网箱会因此出现网箱破损等问题, 但自升式网箱能够在正常海况条件下网箱顶部漂浮于海面, 方便生产管理, 而在台风或者赤潮来临时, 能够迅速依靠沉箱等方法沉到水下较深位置^[9], 从而抵御复杂海况的不良影响, 减小波浪对网箱系统的冲击, 确保网箱系统安全, 为养殖

收稿日期: 2023-12-13 修回日期: 2024-03-16

资助项目: 国家自然科学基金青年基金 (32203000); 国家自然科学基金 (31972844); 企业委托项目——生态型可降解人工集鱼装置 (FAD) 的研究; 企业委托项目——波纹龙虾吊笼养殖技术研发及应用示范

第一作者: 李亚婕, 从事网箱、渔具及渔具材料研究, E-mail: liyajie9811@163.com

通信作者: 石建高 (照片), 从事深远海网箱、养殖围栏、渔具及渔具材料等研究, E-mail:

jiangaoshi666@163.com



安全保驾护航^[10-11]。

我国已成功开发出深远海自升式可升降网箱平台、“伏羲一号”风渔融合网箱平台等深远海设施。随着深远海网箱养殖业的发展,我国研发了多种深远海网箱技术,申请了100多项相关专利^[12]。吴韩等^[13]发明了一种自升式网箱装置,由箱体、升降装置、葫芦链条总成组成,这种自升式网箱装置升降葫芦链条不仅可用于升起和降下箱体,使箱体可以下降至海中更深处,而且还可以在箱体上升和下降过程中更好地保护箱体,将箱体的载荷转移到升降葫芦链条上,保证设备的可靠性。于斌等^[14]发明了一种自升式可升降网箱平台,包括船体、自升式可升降网箱、养殖水体、桩腿、桩靴以及升降系统,此平台主体结构可靠,安全性强;高海况生存能力强、能够抵御恶劣海况;养殖水体容量可以设置灵活、操作灵活、适用水深范围广、建造成本低、功能扩展性强、养殖效率高。蒙占彬等^[15]发明了一种用于自升式海洋平台的可升降复合多功能养殖网箱,包括网箱主体、升降系统,升降系统包括升降装置和锁紧装置,网箱主体能够通过升降系统安装于海洋平台,可将网箱从平台降至海底一定深度进行高端渔业养殖。此新型网箱可以与自升式海洋平台组成多功能平台,实现离岸高端渔业养殖、水下观光休闲及海洋环境监测等,实现高效资源利用和经济效益。随着网箱养殖的不断发展,网箱结构形式更加丰富,在实际海洋应用中,网箱需要面临的环境条件更为复杂^[16],受限于对自升式网箱结构安全性等方面的考虑,这类网箱在我国水产养殖领域尚未被大规模运用,开展自升式网箱及其配套支撑系统的水动力性能,对于优化与改进网箱结构、减少极端环境下养殖损耗、提升网箱系统安全、助力网箱规模化应用等方面具有现实的意义。本研究通过物理模型实验测试了不同流速、不同迎流角度、不同下潜深度以及安装不同类型网衣等因素对钢结构网箱受力的影响,可为自升式网箱的设计、布置及网衣选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验设备

模型实验在国家远洋渔业工程技术研究中心动水槽内进行。实验动水池主尺度为9.0 m(长)×3.5 m(宽)×2.0 m(深),采用的测力传感器型号为LC-FW-100,量程为200 N,非线性误差控制在约0.5%;实验时采用高清摄像机来拍摄网箱在水中的实验形态。

<https://www.china-fishery.cn>

1.2 实验模型网箱与样品

实物网箱 本次实验采用的网箱为方形钢结构自升式网箱^[12-13,17],主要结构包括网箱主体框架、升降杆及网衣(图1)。网箱主体部分是尺寸为27 m(长)×27 m(宽)×15 m(高)的方形结构,底和顶面框架直径为0.66 m,升降杆为4根直径为1.35 m、总高度为45.00 m的铁柱,放置于网箱主体的四个角落,设计入泥深度为9.00 m。



图1 自升式网箱

Fig. 1 Lifiable cage

模型网箱 使用田内相似准则制作网箱模型,选取大尺度比 $\lambda=40$,小尺度比 $\lambda'=1$ 。模型网箱规格尺寸为0.675 m(长)×0.675 m(宽)×0.465 m(高),整体框架由Q345等级高强钢结构材料制成,用这种材料制成的框架不易变形,可以保持模型网箱的容积率不变,减小实验误差(图2)。



图2 模型网箱

Fig. 2 Model cage

网衣 随着深远海养殖业的高质量发展,人们对网衣材料的要求也在不断提高,传统网衣

中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

材料已不能满足实际生产需求。本实验采用超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 经编网衣和六角形网目聚酯网衣 (PET 网衣) 两种不同材料制成的网衣作为模型网箱网衣。超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 经编网具有良好的耐磨性能, 抗冲击性优于其他渔网材料^[18], 在实际生产过程中可根据对网衣物理性能的要求调整编织结构与后处理工艺; PET 网衣具有网目尺寸稳定、网目几何形状保持不变、结节耗料少、表面光滑不伤鱼体、结构紧密、高海况下不易附着海洋生物等优点^[19]。除本实验用网衣外, 本课题组还联合中水集团远洋股份有限公司、青岛浩赛机械有限公司等单位开展了高合金网衣、可降解网衣等网衣材料开发与应用, 上述材料进一步推动了现代渔业的技术升级。分别采用 3 种不同规格的 UHMWPE 经编网衣与 PET 网衣进行实验, 网衣具体规格见表 1。

表 1 网衣规格

Tab. 1 Specifications of netting

种类 types	网目尺寸/mm mesh size	网线直径/mm twine diameter	特殊处理 special treatment
超高分子量聚乙烯经编网衣 UHMWPE warp knitted netting	55	2.9	无 nil
	67	4.6	树脂处理 resin treatment
	147	6.0	表面涂层处理 coating treatment
PET网衣 PET netting	40×45	3.0	黑色 black
	50×70	3.0	黑色 black
	70×110	3.0	黑色 black

UHMWPE 经编网衣装配时, 侧面部分水平缩结系数约 0.7, 底、顶面网衣水平缩结系数为 0.50~0.55; PET 网衣按 PET 网衣原有形态装配, 不涉及缩结系数。

1.3 模型网箱布置

本实验网箱为长方体, 实物网箱升降杆下方一部分会放置于海底泥沙中固定, 因此底部没有可移动的装置, 但模型网箱在实验时要使模型网箱在水槽中进行水平移动, 为达到此操作目的, 在模型网箱的升降杆底部添加了 4 个无阻尼滑轮。

在水槽的进水口中央位置放置拉力传感器, 其中模型网箱主体部分的两侧最宽位置上下两点与拉力传感器两侧的点构成一个平面, 两个平面相互平行且与水流方向平行 (图 3), 待流速平稳之

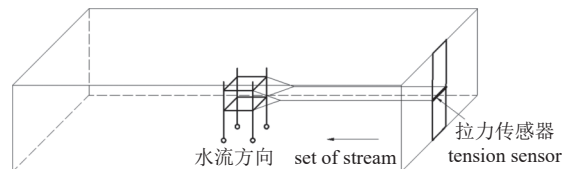


图 3 模型网箱布置示意图

Fig. 3 Model cage layout diagram

后读取拉力传感器的显示数据。

1.4 实验内容

根据设计经验和相关的参考文献, 网箱的受力与水流速度、网箱的迎流角度、网箱主体高度、网衣规格、材料等有关^[20-22]。本实验通过改变网箱与水流的相对速度、网箱迎流角度、网箱主体距水面高度、不同规格、材料的网衣等条件, 研究这些条件对网箱受力大小的影响。

实验工况 正常养殖 (网箱顶面升至超水面 1 m)、避台 (网箱整体降至水下, 顶面距水面的距离约 10 m) 和拖航 (网箱不装配网衣, 框架顶面位于水面)。正常养殖和拖航工况对应模型实验中网箱框架底面距槽底 80 cm (顶面超水面约 2~3 cm), 记为 D80 工况; 避台工况对应模型实验中网箱框架底面离距槽底约 50 cm (网箱顶面距水面的距离约 28 cm), 记为 D50 工况。

网箱与水流的相对速度 根据实物网箱放置区域流速范围, 本次选取原形流速为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 m/s, 根据田内相似准则^[9] 换算的实验流速对应设置为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 m/s。

网箱迎流角度 本实验设置 3 种迎流角度, 冲角分别为 90°、45°、30°。

网箱布置 不同工况、不同流速和不同冲角下, 网箱框架及桩腿、装配 UHMWPE 网衣和装配 PET 网衣的网箱实际布置如图 4~图 6 所示。

1.5 数据换算

多年来, 田内相似准则一直是日本和中国在进行水槽网具模型实验时, 用于模型、实物之间的换算准则, 本模型实验在国家远洋渔业工程技术研究中心动水槽内进行, 田内相似准则符合本实验的实验场景。根据田内相似准则, 实物网箱与模型网箱之间力之比见式 (1)^[23]:

$$\frac{F_1}{F_2} = \lambda^2 \lambda' \frac{(\gamma_{n1} - 1)}{(\gamma_{n2} - 1)} \quad (1)$$

式中, 下标“1”为原型, 下标“2”为模型, 下同; λ 、 λ' 分别为大尺度比和小尺度比; γ_{n1} 、 γ_{n2} 分别为实物网箱和模型网箱材料的比重; F_1 、 F_2 分别

为实物网箱和模型网箱所受力大小。

2 结果

将实验结果换算为实际原型受力数据进行分析, 讨论网箱阻力与流速、迎流角度、下潜深度、网衣材料对网箱受力的大小。

2.1 网箱阻力与流速的关系

将水流速度作为唯一自变量, 得出的网箱整体受力随水流速度变化而变化的曲线见图 7。网箱整体受力随着水流速度的增大而呈现指数增大的趋势, 但是各网衣的增大速度有所不同, 菱形网目的 UHMWPE 网衣受力增大的速度明显快于

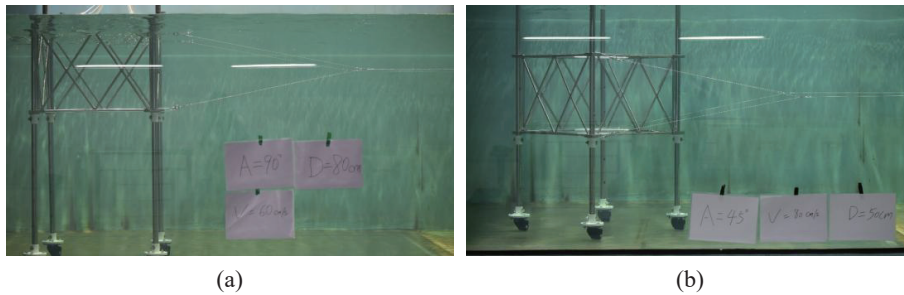


图 4 网箱框架及桩腿(无网衣)实验实景

(a) D80 工况, 冲角 90°, 流速 0.6 m/s。 (b) D50 工况, 冲角 45°, 流速 0.8 m/s; D80. 网箱框架底面距槽底 80 cm, D50. 网箱框架底面离距槽底约 50 cm, 下同。

Fig. 4 Cage frame and leg (no netting) test scene

(a) D80 condition, angle of attack 90°, flow rate 0.6 m/s. (b) D50 condition, angle of attack 45°, flow rate 0.8 m/s; D80. the bottom of the cage frame is 80 cm away from the bottom of the tank, D50. the bottom of the cage frame is about 50 cm away from the bottom of the tank, the same below.



图 5 装配 UHMWPE 网衣网箱实验实景

(a) D80 工况, 冲角 45°, 流速 0.6 m/s。 (b) D50 工况, 冲角 90°, 流速 0.4 m/s。

Fig. 5 The test scene of assembling UHMWPE net clothing cage

(a) D80 working condition, angle of attack 45°, flow rate 0.6 m/s. (b) D50 working condition, angle of attack 90°, flow rate 0.4 m/s.

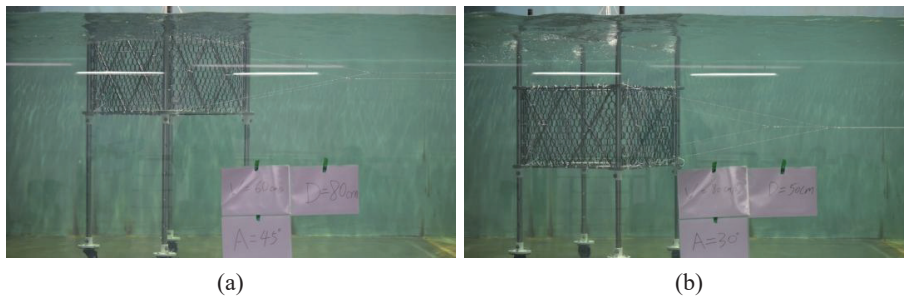


图 6 装配 PET 网衣网衣网箱实验实景

(a) D80 工况, 冲角 45°, 流速 0.6 m/s。 (b) D50 工况, 冲角 30°, 流速 0.8 m/s。

Fig. 6 The assembly of PET netting cage test scene

(a) D80 working condition, angle of attack 45°, flow rate 0.6 m/s. (b) D50 working condition, angle of attack 30°, flow rate 0.8 m/s.

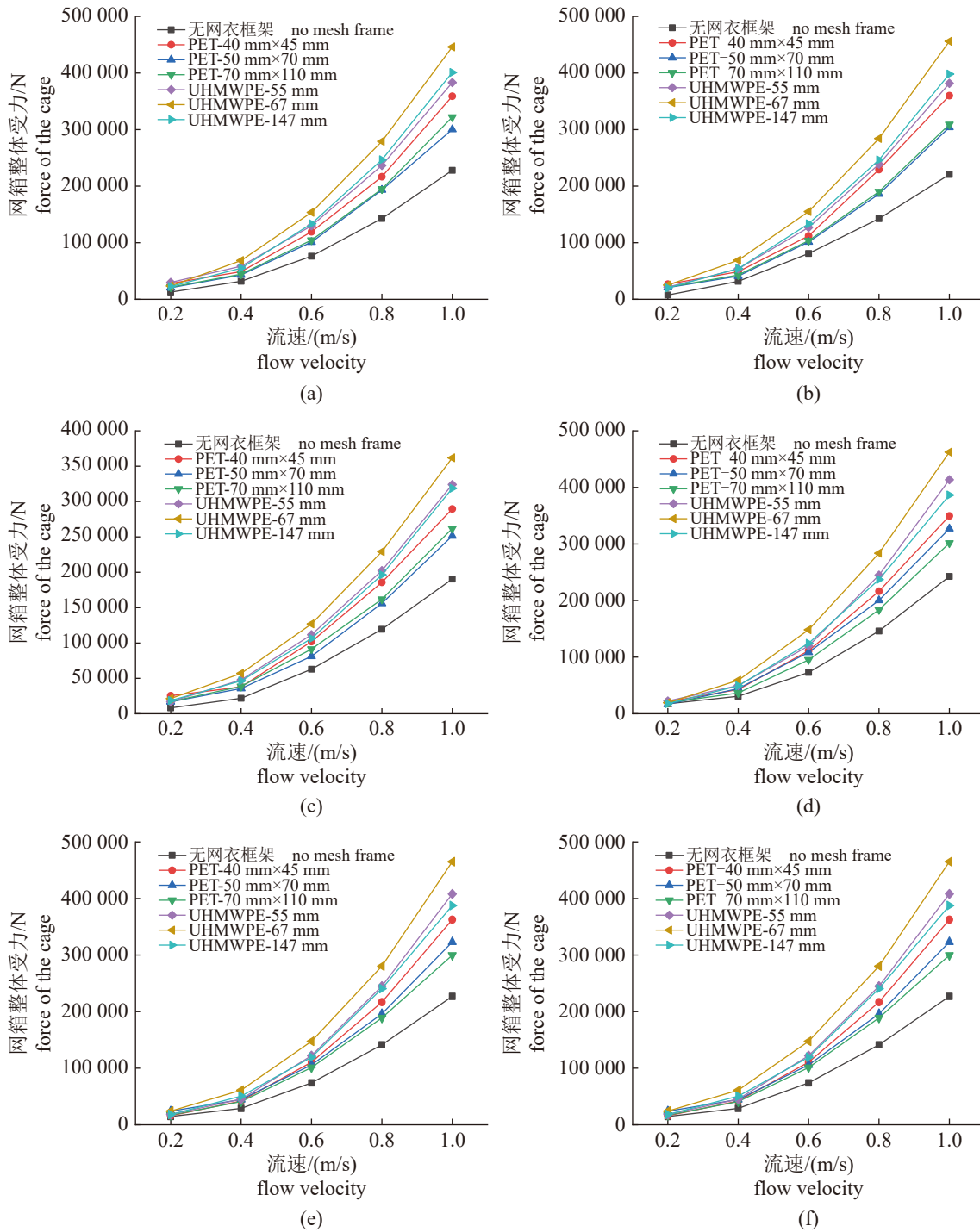


图 7 网箱受力随流速变化曲线图

(a) D50, 冲角 30°; (b) D50, 冲角 45°; (c) D50, 冲角 90°; (d) D80, 冲角 30°; (e) D80, 冲角 45°; (f) D80, 冲角 90°.

Fig. 7 The curve of the force of the cage changing with the flow velocity

(a) D50, angle of impact 30°; (b) D50, angle of impact 45°; (c) D50, angle of impact 90°; (d) D80, angle of impact 30°; (e) D80, angle of impact 45°; (f) D80, angle of impact 90°.

六边形网目的 PET 网衣。

在网衣大小相同的情况之下, 下潜深度与迎流角度相同时, 水流速度越大, 网箱整体受力越

大; 与 UHMWPE 网衣相比, 六边形网目的 PET 网衣在应用于实际渔业生产过程中所承受的水流冲击力更小; 这种情况的原因是 PET 网衣的六边

形网目结构优于菱形网目结构, 并且 PET 网衣相对于 UHMWPE 网衣来说网线表面更加光滑, 在流体中受力能够减小。

2.2 迎流角度与网箱受力的关系

将迎流角度作为唯一自变量, 得出的网箱整体受力随迎流角度变化而变化的曲线见图 8。将网箱的迎流角度作为唯一自变量, 以探究网箱的迎流角度与网箱的整体受力之间的关系 (由于本模拟网箱为底面正方形的长方体, 因此实验只设计了 3 个迎流角度), 可以看出, 当迎流角度从 30° 增加到 45° 时, 受力会有上升的趋势; 而当迎流角度增加到 90° 时, 受力最小。

综上所述, 当网箱迎流角度为 90°, 也就是网箱整体与水流方向垂直时, 网箱的受力最小; 这种原因是网箱在此时的迎流面面积最小。由此推测, 网箱迎流角度在 30°~60° 可能会受到最大的

冲击力, 因此在网箱布置时, 应当尽可能将网箱正面朝向海浪冲击的方向, 以此来减少水流冲击对网箱的破坏, 达到抗风浪的目的, 最大程度保护网箱, 保障渔业生产活动持续有效地进行。

2.3 下潜深度对模型网箱受力的影响

将下潜深度作为唯一自变量, 即不同工况下, 控制其他因素相同, 比较了网箱距水底的不同高度对网箱整体的受力情况的影响, 得出网箱整体受力随下潜深度变化而变化 (图 9)。D50 工况下, 网箱的受力普遍大于 D80 工况, 即网箱在距水底 50 cm 时的受力大于网箱距水底 80 cm 时的受力, 而这种差距会随水流速度的增加越来越小。直至流速增加到 1.0 m/s 时, 部分 D50 工况下网箱的受力已经小于 D80 工况。这是由于在水流速度较小时, D50 工况的网箱由于离水面相对 D80 工况较远, 受水流黏滞力相对较小, 此时 D50 工况的

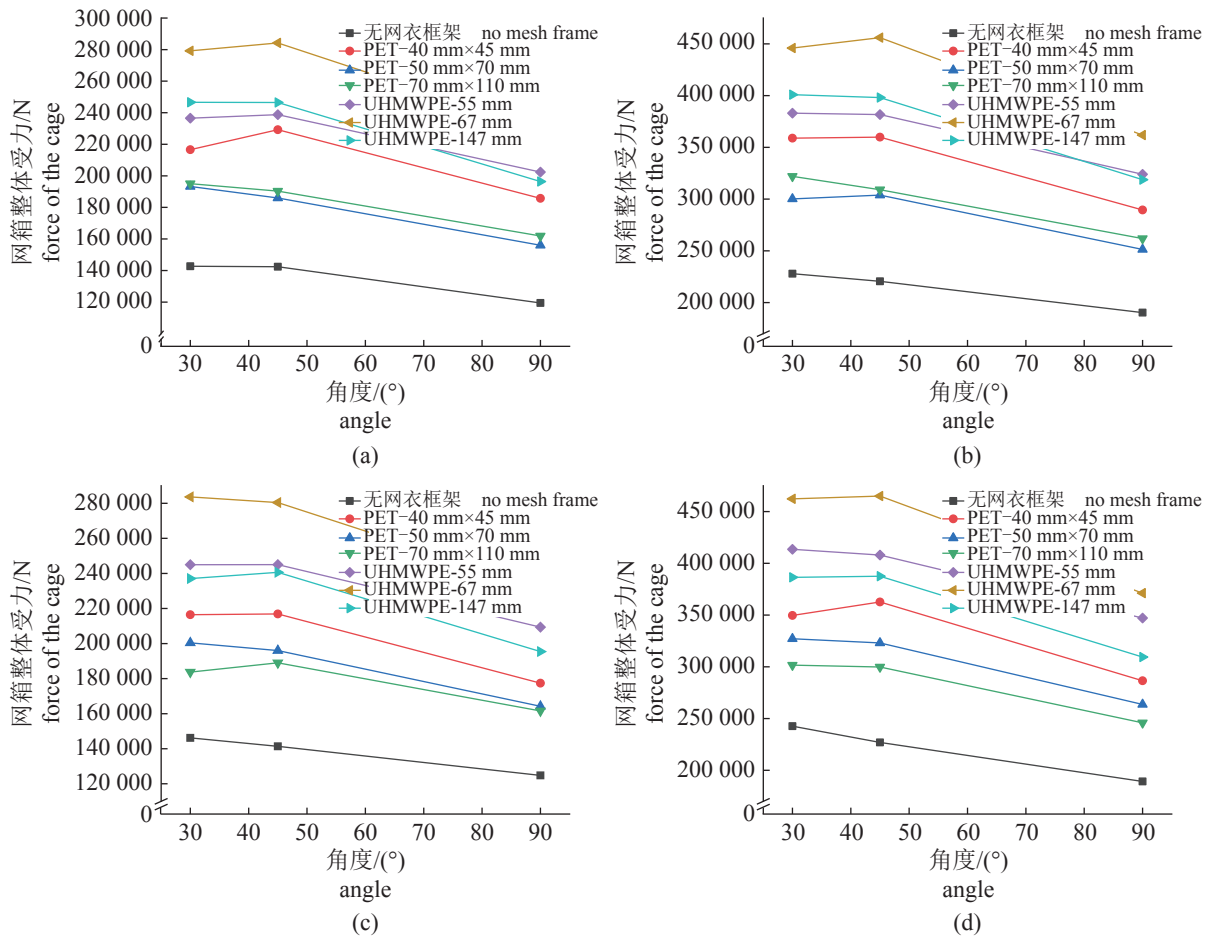


图 8 网箱受力随迎流角度变化曲线图

(a) D50, 0.8 m/s; (b) D50, 1.0 m/s; (c) D80, 0.8 m/s; (d) D80, 1.0 m/s.

Fig. 8 The curve of the force of the cage changing with the angle of the incoming flow

(a) D50, 0.8 m/s; (b) D50, 1.0 m/s; (c) D80, 0.8 m/s; (d) D80, 1.0 m/s.

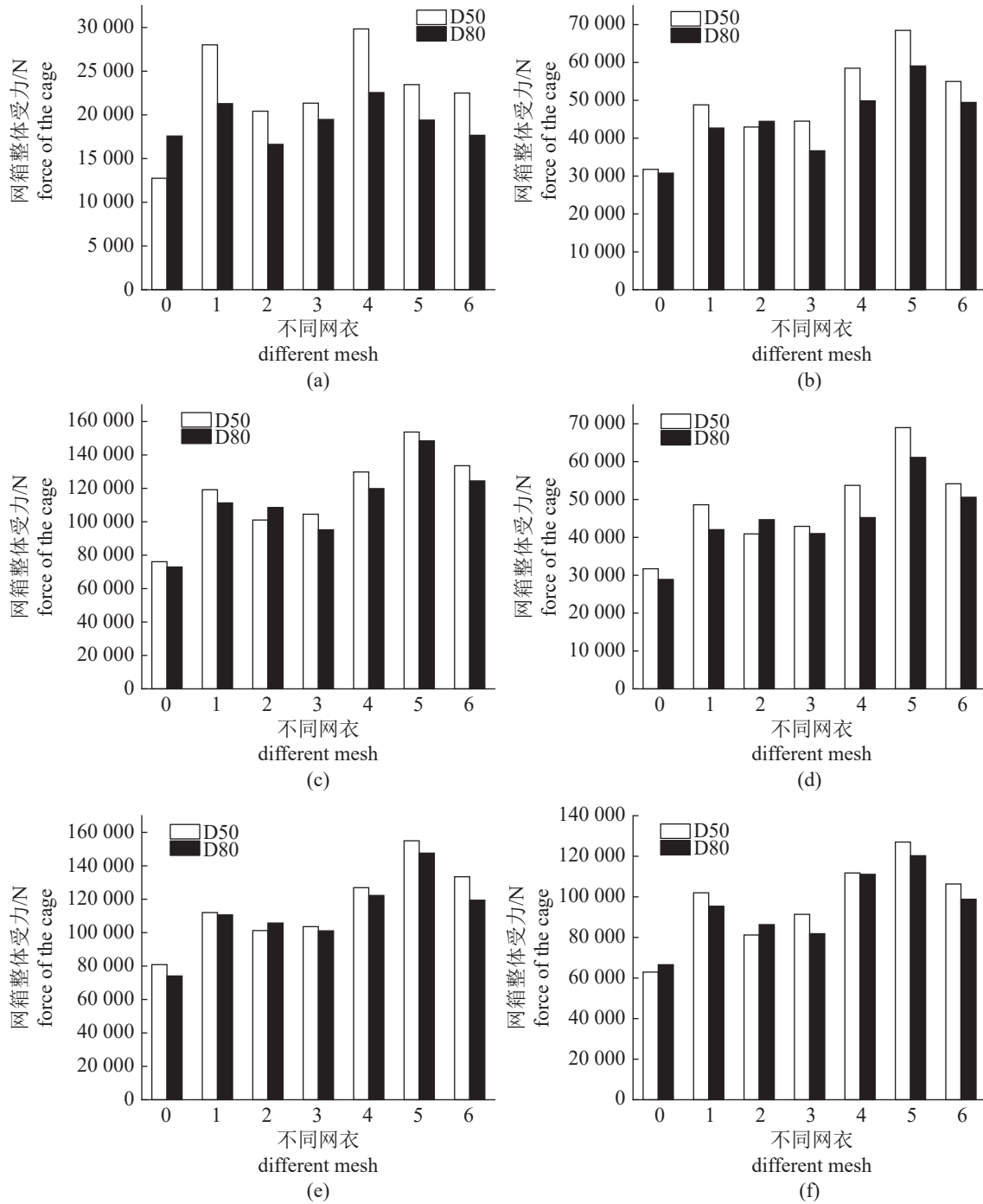


图 9 网箱整体受力随下潜深度变化柱状图

(a) 30°, 0.2 m/s; (b) 30°, 0.4 m/s; (c) 30°, 0.6 m/s; (d) 45°, 0.4 m/s; (e) 45°, 0.6 m/s; (f) 90°, 0.6 m/s. 0. 无网衣框架, 1. PET-40 mm×45 mm, 2. PET-50 mm×70 mm, 3. PET-70 mm×110 mm, 4. UHMWPE-55 mm, 5. UHMWPE-67 mm, 6. UHMWPE-147 mm.

Fig. 9 The comparison bar chart of the force of the cage with the change of the diving height

(a) 30°, 0.2 m/s; (b) 30°, 0.4 m/s; (c) 30°, 0.6 m/s; (d) 45°, 0.4 m/s; (e) 45°, 0.6 m/s; (f) 90°, 0.6 m/s; 0. no mesh frame, 1. PET-40 mm×45 mm, 2. PET-50 mm×70 mm, 3. PET-70 mm×110 mm, 4. UHMWPE-55 mm, 5. UHMWPE-67 mm, 6. UHMWPE-147 mm.

流速相对更大, 随着整体流速增加, 动水槽紊流带来的波浪在水面位置逐渐增大, 抵消了 D80 工况的黏滞力, 并且增大了 D80 工况的受力。而 D50 工况的网箱此时由于在水面之下, 受到波浪

影响较小, 因此在网箱的受力上小于 D80 工况的网箱。

研究结果显示, 在 D50 的工况下, 网箱主体位于水槽高度的中间位置, D80 工况时, 网箱主

体位于水槽高度的上半部分, 而水槽水流速度在水槽高度的中间位置处最大, 因此网箱在 D50 工况下的受力要大于 D80 工况下的受力。在实际渔业生产中, 实物养殖网箱在台风来临时会下降到水流速度较小的避台工况, 以躲避台风, 从而大大提高网箱设施的安全性和抗风浪性能。

2.4 网衣材料对模型网箱受力的影响

由流体力学知识得知, 在水中的物体所受到的阻力主要是表面摩擦力和形状阻力, 分析得水阻力公式:

$$R = C_x \frac{\rho S V^2}{2} \quad (2)$$

$$C_x = f\left(R_e, \frac{m}{n}\right) \quad (3)$$

式中, R 为阻力 (N); S 为特征面积 (m^2); V 为网片和水流相对速度 (m/s); ρ 为水的密度 (kg/m^3); C_x 为阻力系数, 无量纲, 是反映流态的雷诺数的函数, 同时受几何形状的影响; m/n 为特征长度之比, 无量纲; R_e 为雷诺数, 无量纲。

在渔具计算中, 由于流体 (水) 的密度 ρ 变化不大, 也有用 k_x 代替 $1/2C_x\rho$, 称为 k_x 为阻力系数。需要注意的是, 这里的 k_x 是有量纲的, 单位是 (kg/m^3)。所选择的单位不同, k_x 值也会有变化。

阻力公式有以下形式:

$$R_x = K_x S V^2 \quad (4)$$

式中, 影响网片水动力的主要因素为速度 V 、面积 S 、流体密度 ρ 以及与流态、形状等有关的水动力系数 C_x 。

菱形无结网衣的线面积公式:

$$S_s = \frac{M+N}{2} H \times 4ad \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$\text{或: } S_s = \frac{L(M+N)d}{1000} \quad (6)$$

对于六边形网目的 PET 网衣来说, 视六角形网目网片垂直边为菱形网片的结节, 将六角形网片的双线直角边拆分为单个六角形, 调整得到 PET 网衣线面积公式:

$$S_s = 8ad \times H \frac{M+N}{2} \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中, M 为网片顶部横向目数 (目); N 为网片底部横向目数 (目); H 为网片纵向目数 (目); L 为网片拉紧长度 (m); d 为网线直径 (mm); a 为网目目

脚长 (mm); 网目尺寸 $2a$; S_s 为网片线面积 (m^2)。

将实验用 6 种网衣的侧面网衣带入上述公式, 并将 3 种超高分子量聚乙烯网衣和 3 种 PET 网衣进行对比, 比值为:

$$A1 = \frac{55 \text{ mm UHMWPE}}{40 \text{ mm PET}} = 0.79$$

$$A2 = \frac{67 \text{ mm UHMWPE}}{50 \text{ mm PET}} = 2.11$$

$$A3 = \frac{147 \text{ mm UHMWPE}}{80 \text{ mm PET}} = 2.13$$

根据网箱模型水动力实验受力结果, 对迎流面积为 90° 时的网箱, 将这 6 种网衣去掉空框架之后的受力进行对比, 并取平均值, 比值分别为:

$$B1 = \frac{55 \text{ mm UHMWPE}}{40 \text{ mm PET}} = 1.41$$

$$B2 = \frac{67 \text{ mm UHMWPE}}{50 \text{ mm PET}} = 2.38$$

$$B3 = \frac{147 \text{ mm UHMWPE}}{80 \text{ mm PET}} = 2.41$$

分析结果, 网衣受力面积的比值与网衣线面积比值都有所增加, 即 UHMWPE 网衣受力比相同线面积的 PET 网衣面积更大, 这是因为 PET 网衣的六边形网目结构相对于 UHMWPE 网衣的菱形网目结构在水中受阻力更小^[24], 并且 PET 网衣的光滑表面结构使得其在水中摩擦力更小, 合理的网目结构方式和摩擦力较小的网衣表面结构是 PET 网衣水动力较小的主要原因。

3 讨论

本研究利用了物理模型实验和田内准则计算的方法, 探究了不同流速、不同迎流角度、不同下潜深度以及不同网衣材料 (UHMWPE 网衣以及 PET 网衣) 对网箱受力的影响, 对实验数据进行分析后, 本研究得出如下主要结论:

① 在网衣大小相同的情况之下, 并且下潜深度与迎流角度相同时, 网箱整体受力与水流速度呈线性关系, 水流速度越大, 网箱整体受力越大; 与 UHMWPE 网衣相比, 六边形网目的 PET 网衣所承受的水流冲击力更小。

② 网箱整体与水流方向垂直时, 网箱的受力最小, 且网箱迎流角度在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时可能会受到最大的冲击力, 因此在网箱布置时, 应当尽可能将网箱正面朝向海浪冲击的方向, 并且采取相应措施避免网箱下潜后在复杂海况下改变原始设置角

度, 以此来减少水流冲击对网箱的破坏。

③ 模型网箱在距水底 50 cm 时的受力大于网箱距水底 80 cm 时的受力, 在实际的海洋环境中, 海水深度影响流速, 因此, 实物自升式养殖网箱等升降式网箱在台风来临时应下潜到适宜深度, 以此躲避台风, 从而保障养殖网箱设施的安全。

④ UHMWPE 网衣受力比相同线面积的 PET 网衣面积更大, 综合结论①, 建议在网箱设计时可以选择六角形网目 PET 网衣、UHMWPE 网衣等高性能网衣; 然而, 在实际养殖生产中人们需要根据养殖环境、养殖设施、养殖鱼类或虾蟹类等因素综合考虑, 选择合适的养殖网衣材料。此外, 附着物可使得网衣的受力增加至原来的 10 倍以上^[25], 建议在养殖设施结构设计时要充分考虑附着物对结构强度的影响, 以保障养殖设施安全。除本实验用网衣材料外, 本课题组还联合广东省海洋投资发展有限公司、惠州市益晨网业科技有限公司等单位开展了低蠕变纤维网绳等渔用新材料在波纹龙虾 (*Panulirus homarus*) 吊笼、财金“海上粮仓壹号”网箱上应用, 上述渔用新材料进一步助力了现代渔业的高质量发展。目前, 我国试制的深远海养殖设施中结构破损、网破鱼逃等事故时有发生, 且高效投喂、环境监测等配套装备系统的智能化水平不高, 是影响深远海养殖业发展的主要因素, 因此, 深远海养殖业前景广阔, 但任重道远。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] FAO, Subasinghe R. State of world aquaculture: 2006[M]. Rome: FAO, 2006.
- [2] 徐皓, 江涛. 我国离岸养殖工程发展策略 [J]. 渔业现代化, 2012, 39(4): 1-7.
Xu H, Jiang T. Development strategy of offshore aquaculture engineering in China[J]. Fishery Modernization, 2012, 39(4): 1-7 (in Chinese).
- [3] 董双林, 董云伟, 黄六一, 等. 迈向远海的中国水产养殖: 机遇、挑战和发展策略 [J]. 水产学报, 2023, 47(3): 039601.
Dong S L, Dong Y W, Huang L Y, et al. Toward offshore aquaculture in China: opportunities, challenges and development strategies[J]. Journal of fisheries of china, 2023, 47(3): 039601.
- [4] Xu Z J, Qin H D. Fluid-structure interactions of cage based aquaculture: from structures to organisms[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107961.
- [5] 廖静. 深水抗风浪网箱养殖技术: “蓝色粮仓”向深海延伸 [J]. 海洋与渔业, 2019(9): 64-66.
Liao J. Deepwater anti-wave cage culture technology: 'blue granary' extends to the deep sea[J]. Ocean and Fishery, 2019(9): 64-66 (in Chinese).
- [6] 石建高, 孙满昌, 贺兵. 海水抗风浪网箱工程技术 [M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
Shi J G, Sun M C, He B. Seawater anti-wave cage engineering technology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2016 (in Chinese).
- [7] 尹华, 张师军, 张薇, 等. 热塑性聚酯工程塑料的进展 [J]. 合成树脂及塑料, 2002, 19(5): 65-70.
Yin H, Zhang S J, Zhang W, et al. The development of thermoplastic polyester engineering plastics[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2002, 19(5): 65-70 (in Chinese).
- [8] 农业农村部渔业渔政管理局. 2021 年全国渔业经济统计公报发布 [N]. 中国渔业报, 2022-07-25(1).
Fishery Administration Bureau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs. In 2021, the national fishery economic statistics bulletin was released[N]. China Fisheries News, 2022-07-25(1) (in Chinese).
- [9] 黄六一, 杨正, 李玉岩, 等. 水流作用下自升降式张力腿网箱水动力学特性试验研究 [J]. 渔业现代化, 2021, 48(2): 9-15.
Huang L Y, Yang Z, Li Y Y, et al. Experimental study on the hydrodynamic characteristics of self-lift tension leg cage in current[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(2): 9-15 (in Chinese).
- [10] 张本. 介绍一种近海养鱼张力腿网箱 [J]. 渔业现代化, 2002(6): 36-37.
Zhang B. Introduction to tension leg cages[J]. Fishery Modernization, 2002(6): 36-37 (in Chinese).
- [11] 张本. 考察挪威近海张力腿网箱养鱼的启发 [J]. 中国渔业经济, 2003(2): 47-48.
Zhang B. Enlightenment of investigating tension-leg-cages aquaculture in Norway[J]. Chinese Fisheries Economics, 2003(2): 47-48 (in Chinese).
- [12] 石建高, 余雯雯, 卢本才, 等. 中国深远海网箱的发展现状与展望 [J]. 水产学报, 2021, 45(6): 992-1005.
Shi J G, Yu W W, Lu B C, et al. Development status and

- prospect of Chinese deep-sea cage[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(6): 992-1005 (in Chinese).
- [13] 吴韩, 颜赤勇, 麦志辉, 等. 一种自升式网箱装置: 214546580U[P]. 2021-11-02.
Wu H, Yan C Y, Mai Z H, *et al.* Self-elevating net cage device: 214546580U[P]. 2021-11-02 (in Chinese).
- [14] 于斌, 常新江, 刘海, 等. 一种自升式可升降网箱平台: 212813598U[P]. 2021-03-30.
Yu B, Chang X J, Liu H, *et al.* Self-elevating net cage platform: 212813598U[P]. 2021-03-30 (in Chinese).
- [15] 蒙古彬, 高畅, 冯志强, 等. 一种用于自升式海洋平台的可升降复合多功能养殖网箱: 111411620A[P]. 2020-07-14.
Meng Z B, Gao C, Feng Z Q, *et al.* Lifting compound multifunctional culture cage for self-elevating offshore platform: 111411620A[P]. 2020-07-14 (in Chinese).
- [16] 庞国良, 黄小华, 陈超核, 等. 自升式深海网箱不同工况下结构安全性评估研究 [J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(6): 56-68.
Pang G L, Huang X H, Chen C H, *et al.* Research on structural safety evaluation of jack-up offshore net cage under different conditions[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 56-68 (in Chinese).
- [17] 郭建平, 吴常文. 日本钢结构升降式大型深水网箱结构原理介绍 [J]. *渔业现代化*, 2004(3): 26-27.
Guo J P, Wu C W. Introduction to the structural principle of Japanese steel structure lifting large-scale deep-water cage[J]. *Fishery Modernization*, 2004(3): 26-27 (in Chinese).
- [18] 孙斌, 余雯雯, 石建高, 等. 渔用高性能网衣材料的研究进展 [J]. *渔业现代化*, 2020, 47(6): 1-7.
Sun B, Yu W W, Shi J G, *et al.* Research progress of high performance netting materials for fishing[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(6): 1-7 (in Chinese).
- [19] 钱忠敏. 我国深远海养殖网箱网衣材料现状及发展趋势浅析 [J]. *中国水产*, 2023(8): 43-45.
Qian Z M. Analysis of the current situation and development trend of cage netting materials in deep sea aquaculture in China[J]. *China Fisheries*, 2023(8): 43-45 (in Chinese).
- [20] 赵云鹏. 深水重力式网箱水动力特性数值模拟研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
Zhao Y P. Numerical investigation on hydrodynamic behavior of deep-water gravity cage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007 (in Chinese).
- [21] 黄六一, 梁振林, 万荣, 等. HDPE 圆形升降式网箱下沉时最大倾角的研究 [J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(6): 953-958.
Huang L Y, Liang Z L, Wan R, *et al.* Study on the maximum inclined angle of a HDPE circle submersible net cage[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(6): 953-958 (in Chinese).
- [22] 于松辰. 波流作用下重力式网箱动力响应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Yu S C. Dynamic response analysis of gravity cage under waves and current[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019 (in Chinese).
- [23] 陈雪忠, 黄锡昌. 渔具模型试验理论与方法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011: 119-153.
Chen X Z, Huang X C. Theory and method of fishing gear model test[M]. Beijing: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2011: 119-153 (in Chinese).
- [24] 詹杰民, 胡由展, 赵陶, 等. 渔网水动力试验研究及分析 [J]. *海洋工程*, 2002, 20(2): 49-53, 59.
Zhan J M, Hu Y Z, Zhao T, *et al.* Hydrodynamic experiment and analysis of fishing net[J]. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(2): 49-53, 59 (in Chinese).
- [25] 凌爱军, 梁园华, 赵德辉, 等. 海洋养殖柔性网衣结构水动力特性研究进展 [J]. *渔业科学进展*, 2024, 45(4): 223-236.
Ling A J, Liang Y H, Zhao D H, *et al.* Research process for the hydrodynamic characteristics of flexible net structures for offshore aquaculture[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(4): 223-236 (in Chinese).

Hydrodynamic performance of self-elevating cage based on model test

LI Yajie^{1,2}, SHI Jiagao^{2*}, XU Junjie^{1,2}, ZHANG Fengyi^{1,2}, LÜ Changlin^{1,2},
WANG Shuting^{2,3}, ZHANG Wenyang², ZHANG Jian¹, FENG Xiaojun⁴

(1. College of Marine Biological Resources and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

3. School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

4. Guangdong Ocean Investment & Development Co., Ltd., Zhanjiang 527499, China)

Abstract: Deep sea cages are an important part of fishery equipment and play an important role in modern fishery. A self-elevating cage is a special form of a deep-sea cage. In actual production, it can quickly sink to a deeper position below the water surface by various means when a typhoon or red tide comes so as to resist the adverse effects of complex sea conditions. This study carried out the hydrodynamic performance of the self-elevating cage and its supporting system to explore the hydrodynamic factors affecting the self-elevating cage, optimize and improve the cage structure, reduce the loss of cultured fish in extreme working environments, and improve the safety of the cage system. In this study, the effects of different flow rates, different inflow angles, different dive depths, and different types of netting on the stress of steel structure self-elevating cages were investigated through physical model experiments. The results showed that when the mesh size, the diving depth, and the inflow angle were the same, the overall force of the self-elevating cage was positively correlated with the water flow velocity. When the cage was perpendicular to the water flow direction, the force of the cage was the smallest, and the inflow angle of the cage might be subjected to the maximum impact force at 30 °-60 °. The force of the model cage at 50 cm from the water bottom was greater than that of the cage at 80 cm from the water bottom. The stress of UHMWPE netting was larger than that of PET netting with the same line area. The results showed that the hexagonal mesh PET net could be preferred in the cage design, and the attachment could increase the force of the net to more than 10 times the original. It was suggested that the influence of the attachment on the structural strength of the cage should be fully considered in the design of the cage structure. This study can provide a reference for the design, layout, and netting selection of self-elevating cages. As a kind of deep-sea aquaculture equipment, the prospect of a self-elevating cage is extensive, but the related work has a long way to go.

Key words: deep-sea aquaculture; self-elevating cage; hydrodynamic; model test; UHMWPE netting; hexagonal mesh PET net; attachments

Corresponding author: SHI Jiagao. E-mail: jiangaoshi666@163.com

Funding projects: Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (32203000); National Natural Science Foundation of China (31972844); Project Commissioned by Enterprise-Research on Ecological Degradable Artificial Fish Collecting Device (FAD); Project Commissioned by Enterprise-Research and Application Demonstration of *Panulirus homarus* Hanging Cage Aquaculture Technology