



栅型兼捕减少装置的规格和倾角对网囊水动力及形态的影响

银利强¹, 唐浩^{1,2,3*}, 许柳雄^{1,2,3}, 刘伟¹,
刘景彬¹, 孙秋阳¹, 张锋¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 为减少副渔获物的兼捕, 提高拖网渔具选择性, 栅型兼捕减少装置已在底拖网渔业中得到广泛应用。兼捕减少装置水动力变化影响着鱼类接触后的行为反应, 从而决定着装置的分隔效率和选择性效果。实验通过动水槽模型探究 3 种不同规格的栅栏 (Grid-0.3 栅、Grid-0.4 栅、Grid-0.5 栅) 分别在倾角 30°、45°和 60°, 3 种状态下对网囊网目张开程度、空间形态和阻力的影响效果。结果发现, ① 无栅栏网囊的网目平均张开角度 $22^\circ \pm 5^\circ$ 。设置 Grid-0.4 栅和 Grid-0.5 栅网囊的网目平均张开角度较无栅栏网囊分别增大了 3.3% 和 18.8%; 而设置 Grid-0.3 栅网囊的网目平均张开角度减少了 9.2%。② Grid-0.4 栅对网囊形态影响程度最小, 贴合网囊流线型; Grid-0.3 栅和 Grid-0.5 栅使网囊发生扭曲形变。③ 设置 Grid-0.3 栅的网囊, 不同倾角下的阻力差异较小, 与无栅栏网囊的阻力相近。以不同倾角设置 Grid-0.4 栅和 Grid-0.5 栅的网囊, 平均网囊阻力分别比无栅栏网囊的阻力高 12.7% 和 24.4%。除 Grid-0.3-A-30°栅外, 有模拟渔获物条件下, 网囊阻力均随栅栏倾角和规格的增大而增加。本研究对我国底拖网选择性研究和保护近底层渔业资源具有重要意义。

关键词: 栅型兼捕减少装置; 阻力; 形态; 规格; 倾斜角度

中图分类号: S 972.13

文献标志码: A

世界众多商业渔业中都存在兼捕和抛弃问题^[1]。根据粮农组织 (FAO) 估计, 2010—2014 年全球海洋每年约有 910 万 t 副渔获物被丢弃, 相当于全球海洋捕获量的 10%^[2]。在全球抛弃率最高的 20 种特定渔业中, 拖网渔具占了 19 种, 其中虾拖网渔业兼捕和抛弃问题尤为严重, 兼捕量占世界总兼捕量的 1/3^[3]。为了解决拖网渔业中副渔获物的兼捕和抛弃问题, 许多国家和渔业组织等通过改善拖网网囊结构和开发兼捕减少装置 (bycatch reduction devices, BRD) 来提高拖网渔具

选择性, 达到保护渔业资源的目的^[4]。改变网囊网目尺寸、形状等能够改善渔具选择性, 但难以实现选择性捕捞, 渔具仍会兼捕到一些受保护的而非目标种类, 如海龟、鲨等大型海洋动物。此外, 当鱼类穿过网目时鱼体容易受到挤压或擦伤, 造成逃逸的鱼类存活率低^[5]。然而, 在网囊前适当位置安装一个能释放兼捕物种的栅型装置, 则可以弥补这一缺陷, 可同时实现对渔获物尺寸和种类选择性。目前, 美国、挪威和澳大利亚等许多国家的法律都规定, 部分拖网渔业要使用兼捕减

收稿日期: 2021-09-21 修回日期: 2022-03-11

资助项目: 国家自然科学基金 (31902426); 上海市青年科技英才扬帆计划 (19YF1419800)

第一作者: 银利强 (照片), 从事渔具与渔法研究, E-mail: 3379056511@qq.com

通信作者: 唐浩, 从事渔具与渔法研究, E-mail: htang@shou.edu.cn



少装置^[6]。拖网渔业使用兼捕减少装置不仅可以实现不同种类的渔获分离, 释放非目标种类, 而且还可改善渔获质量、减轻渔民分拣时间和劳动强度, 对提高拖网渔具选择性和保护渔业资源有重要意义^[7]。

20世纪80年代, 栅型兼捕减少装置开始在挪威虾 (*Pandalus borealis*) 拖网渔业中应用, 由于其结构简单、性能稳定、分隔效率佳, 后被大量应用于甲壳类和鱼类拖网渔业当中, 成为改善拖网渔具种类选择性的主要装置之一^[7-8]。目前, 有众多学者通过海上试验和模型试验研究栅型兼捕减少装置, 以期实现装置的优化设计^[9]。张健等^[7,10]通过海上试验研究了刚性栅栏间距 (15 mm、20 mm 和 25 mm) 对鱼虾类的分隔性能, 结果发现随着栅条间距的增大, 虾类的重量分隔率和 50% 选择体长 (L_{50}) 均逐渐增大, 而对鱼类的重量分隔率逐渐减小。冯春雷等^[11]研究了圆形栅栏栅条间距 (2.5、3.5 和 4.5 cm) 和栅栏倾角 (30°、45°和 60°) 对虾类的分隔效果, 结果发现, 当栅条间距为 2.5 cm 时, 倾角越小, 虾的通过率越低, 但通过率随着栅条间距的增大明显提高。结果证明栅条间距 3.5 cm 和栅栏倾角 45°时, 选择性效果较为理想。Grimaldo 等^[12]比较了不同材料的刚性栅栏和 HDPE 栅, 发现相同面积参数下, HDPE 水流强度更大。并由此设计出一种由玻璃钢和聚酰胺制成, 具有材质轻、低变形、阻力小和高水流强度优点的 Comos 栅。通过测试表明, Comos 栅与 HDPE 栅的选择性效果相近, 但前者的水动力性能更佳。Graham 等^[13]研究了刚性栅栏对挪威海螯虾 (*Nephrops norvegicus*) 拖网的分隔效率, 认为栅条间距决定了栅栏的选择性, 栅栏规格和安装角度会影响网具的整体稳定性。Riedel 等^[14]通过水槽模型试验, 比较 Nordmøre 栅系统不同栅条形状和栅栏倾角时栅栏的水动力性能, 得出直径为 0.32 cm 的圆形栅条在 30°倾角时 Nordmøre 栅的过滤效率最佳。研究发现, 鱼类可以通过它们的侧线系统探测到湍流区域, 并试图停留在湍流区域内^[9]。因此, 许多 BRD 被设计放置在靠近湍流区域或本身产生湍流, 从而增加它们遇到 BRD 和从拖网网中逃逸的可能性^[1]。Parsons 等^[15]认为, BRD 内部及周围的理想水流不应该超过 0.4 m/s, 从而减少体力消耗, 有利于副渔获物成功逃逸。

栅栏的材料、规格、倾角、栅距等因素会改变装置的水动力性能, 从而影响到鱼类的行为反

应、捕获能力以及分隔效率。然而, 目前对栅型兼捕减少装置的研究多为对其分隔效率的评价, 而忽略了设置栅型兼捕减少装置对网囊水动力的影响, 特别是栅栏规格和倾斜角度对网囊阻力和形态变化规律的综合影响。为此, 本研究设计了 3 种规格的刚性栅栏 (Grid-0.3、Grid-0.4 和 Grid-0.5) 分别以 3 种倾角 (A-30°、A-45°和 A-60°) 安装于网囊前部, 采用动水槽模型试验, 探究在不同流速和有、无模拟渔获物条件下, 栅栏对网囊阻力、形态和网目张开程度的影响, 以便为设计优化刚性栅型兼捕减少装置, 改善其分隔性能, 提高拖网渔具的选择性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置模型

栅型兼捕减少装置 实验中简称为栅型 BRD。该装置主体为铝 (棒) 制刚性矩形栅栏。栅栏外框架为塑料卡槽, 用于提供浮力。栅条为圆形, d_1 表示栅条直径, 为 3 mm, d_2 表示栅条间距, 为 10 mm。栅型 BRD 以一定倾斜角度安装在网身和网囊之间的网囊头部 (图 1)。网囊网目尺寸为 $2a=40$ mm, 网线材料聚乙烯, 网线直径 1.2 mm, 网囊 4 片式结构, 每片网衣为 12 目×50 目。网囊横向拉直周长为 192 cm。

栅栏规格 模型根据 Riedel 等^[14]试验方法制作栅栏。设定栅栏横向投影的周长与网囊横向拉直周长的比值为 0.3、0.4 和 0.5, 并设置 3 种不同安装角度 (30°、45°和 60°), 栅栏的长度 (L) 和宽度 (H) 可根据三角函数计算得出 (公式 1 和 2)。9 种不同类型的栅型 BRD 规格见表 1 和图 1。

$$H = \frac{S \times E_t}{4} \quad (1)$$

$$L = \frac{H}{\sin \theta} \quad (2)$$

式中, H 为栅栏宽度, L 为栅栏长度, S 为网囊横向拉直周长, 单位 cm。 E_t 为横向缩结系数, θ 为栅栏倾斜角度。

栅栏倾角 即栅栏与水平方向之间的夹角。栅栏向上倾斜, 安装于网身与网囊之间, 四边均匀的绕缝在网衣上。栅栏的底端位于相同位置, 顶端沿向网囊末端计数对应的横向目数^[1]。式中, a 为目脚, E_t 为横向缩结系数, E_n 为纵向缩结系数, θ 为栅栏倾角。 (公示 3 和 4)

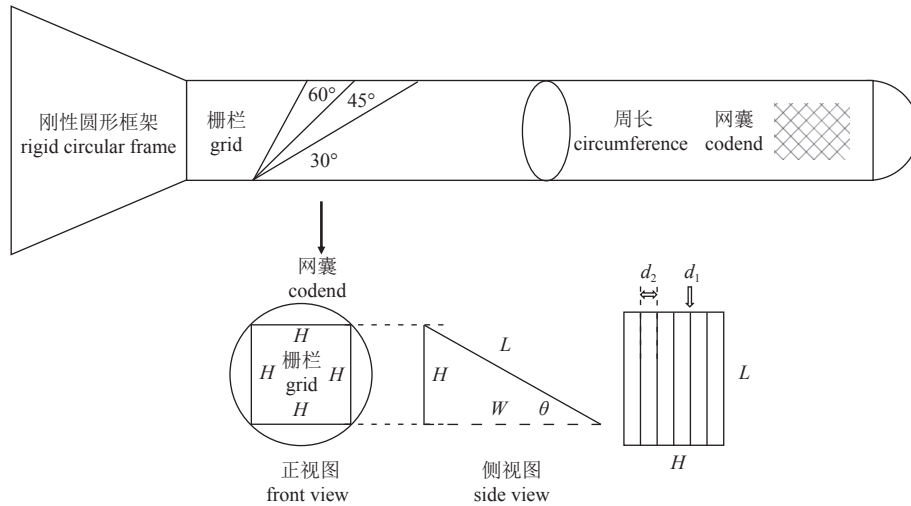


图 1 实验栅型 BRD 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental Grid-BRD

表 1 栅型 BRD 模型参数

Tab. 1 Parameters of the Grid-BRD models

| 编号 serial number | 材料 material | 比例 ratio | 栅栏倾角 grid angle | 栅栏尺寸 grid size | 纵向目数 number of N-mesh |
|---------------------|----------------|-------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| 网囊 Codend | 聚乙烯 PE | | | 2 a=4 cm、4片式、每片12*50目 | |
| Grid-0.3-A-30° | 铝(Al) | 0.3 | 30° | 14.4×28.80 | 6.5 |
| Grid-0.3-A-45° | 铝(Al) | 0.3 | 45° | 14.4×20.36 | 3.5 |
| Grid-0.3-A-60° | 铝(Al) | 0.3 | 60° | 14.4×16.63 | 2 |
| Grid-0.4-A-30° | 铝(Al) | 0.4 | 30° | 19.2×38.40 | 9 |
| Grid-0.4-A-45° | 铝(Al) | 0.4 | 45° | 19.2×27.15 | 5 |
| Grid-0.4-A-60° | 铝(Al) | 0.4 | 60° | 19.2×22.17 | 3 |
| Grid-0.5-A-30° | 铝(Al) | 0.5 | 30° | 24.0×41.57 | 12 |
| Grid-0.5-A-45° | 铝(Al) | 0.5 | 45° | 24.0×33.94 | 7 |
| Grid-0.5-A-60° | 铝(Al) | 0.5 | 60° | 24.0×27.71 | 4 |

注: Grid-0.3-A-45°表示为栅型BRD的横向投影周长与网囊横向拉直周长的比例为0.3, 倾角为45°。
Notes: Grid-0.3-A-45° refers to ratio of the transverse projection perimeter of the Grid-BRD to the transverse straightened perimeter of codend is 0.3 and the grid angle is 45°.

$$Num\ of\ meshes = \frac{L \times \cos \theta}{2a \times E_n} \quad (3)$$

$$E_t^2 + E_n^2 = 1 \quad (4)$$

1.2 试验水槽和仪器

栅型 BRD 模型试验在上海海洋大学循环动水槽中进行, 水槽主尺度为 15 m×3.4 m×2 m, 试验期间水温保持在 21 °C, 水槽侧面为钢化玻璃观测窗, 在观测窗正前方定点放置摄像机 (图 2-a), 用于观察和记录试验过程中网囊的形态变化, 摄像机参数为 1920×1080 pixels², 59 frame/s; 为精确测量网囊阻力, 且尽量保证装备所受阻力低于网囊阻力。试验将网身绕缝在刚性框架上, 刚性框架与六分力仪器组合 (图 2-b), 六分力仪器记录阻力数据的频率设置为 100 Hz, 试验共设置 5 种

流速条件, 分别为 0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 m/s。

在进行模拟渔获物条件时, 采用注水乒乓球代替渔获物, 乒乓球直径为 40 mm, 数量为 100 个, 注水乒乓球密度与水槽中的水密度相同, 约为 1×10³ kg/m³[16]。

1.3 试验流程

试验流程共分为 4 部分。

①刚性框架阻力测量。开始试验之前, 首先对刚性框架阻力值进行测量, 将刚性框架直接与六分力仪器组合, 并使刚性框架平面与水流方向垂直, 将其没入水中 (刚性框架柄入水 10.0 cm), 待流态基本稳定后, 测量不同流速条件下的框架阻力, 在电脑中记录 60 s 刚性框架阻力数据 (共产生 6000 个数据), 最终取平均值。

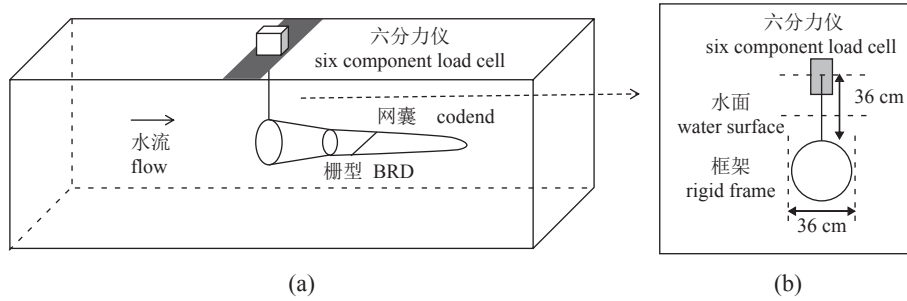


图 2 水槽试验的设置

Fig. 2 The setup of flume tank experiment

②无栅栏条件下网囊形态和阻力测量。将装有网囊的刚性框架组装到六分力仪器上。然后, 将刚性框架柄没入水下 10.0 cm, 并使刚性框架平面与水流方向垂直。调节流速, 待网囊展开, 形态基本稳定后, 使用观测窗正前方的摄像机拍摄整个网囊形态。每调节 1 次流速, 记录 60 s 阻力数据, 拍摄 60 s 网囊形态。

③有栅栏条件下网囊形态和阻力测量。将栅栏安装在网囊和网身之间, 再将框架安装到六分力上, 按第 2 部分有关要求记录对应数据。

④渔获物条件下网囊形态和阻力测量。在第 3 部分的基础上, 将注水乒乓球模拟渔获物从网囊末端放入, 记录对应数据。然后更换栅栏, 重复第 3 部分操作。完成 1 个栅栏及模拟渔获物试验的 5 种流速条件下阻力和形态后, 换另一栅栏, 重复上述过程, 直到所有栅栏全部测完。

1.4 数据处理

①应用 GetData Graph Digitizer 和 Excel 软件, 根据试验设备的位置及特征长度作为标尺, 获得网囊轮廓空间坐标, 将坐标值导出。

②理想状态下, 网囊口为圆形, 横向缩结系数

数为横向自然长度与网衣横向拉直长度的比值 (公示 5 和图 3)。网目缩结系数和网目张开角度关系如表 2。式 (5) 中, L 为网囊周长 (cm), L_0 为网囊横向拉直长度 (cm), r 为网囊自然状态下半径, R 为网囊横向拉直状态下半径, a 为目脚, d 为网目自然横向长度。

$$E_t = \frac{L}{L_0} = \frac{2\pi r}{2\pi R} = \frac{d}{2a} \tag{5}$$

2 结果

2.1 试验设置的刚性框架阻力

当流速为 0.5 m/s 时, 刚性框架阻力约为 2.71 kg; 当流速达到 1.0 m/s 时, 阻力约为 9.52 kg (图 4)。总体上, 刚性框架阻力随水流速度的增加呈线性增加。通过线性拟合得出刚性框架阻力与流速之间的关系式为:

$$R = 5.23V^2 + 5.612V - 1.31 \tag{6}$$

式中, R 为刚性框架阻力; V 为水流速度 (m/s)。

2.2 网囊结构的网目形态

网目张开程度与横向缩结系数 (E_t) 成正比,

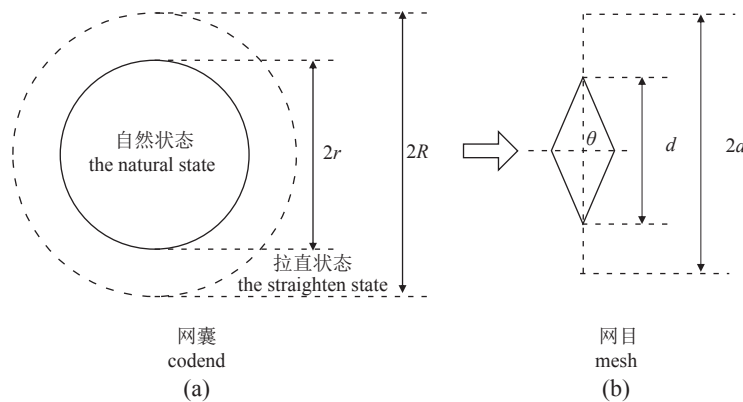


图 3 网囊的缩结系数

Fig. 3 The hanging ratio E_t of codend

表 2 网目缩结系数和网目张开角度
Tab. 2 The hanging ratio and the opening angle of a mesh

| 网目形状 shape of mesh | | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 缩结系数 hanging ratios | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
| 网目张角 mesh opening angle | 23° | 35° | 47° | 60° | 74° | 89° | 106° | 128° |

与纵向缩结系数成反比 (E_n)。为定量描述网囊不同位置的网目形态 (即网目张开角度), 作者利用网囊横向缩结系数 (E_l) 来表达从栅栏前端至网囊末端的网目形态。如图 5 所示, 在空网条件下, 设置的 9 种栅型网囊横向缩结系数变化趋势相似, 即由大逐渐变小, 然后趋于平稳。在相同倾角条件下, 不同规格栅栏网囊的平均横向缩结系数从大到小依次为, Grid-0.5 栅>Grid-0.4 栅>无栅栏>Grid-0.3 栅。无栅栏网囊的平均横向缩结系数为 (0.196 ± 0.044), 网目平均张开角度为 ($22^\circ\pm 5^\circ$)。Grid-0.3 栅不同倾角时网囊平均横向缩结系数为 (0.178 ± 0.039), 网目平均张开角度为 ($20^\circ\pm 4^\circ$), 比无栅栏网囊的平均横向缩结系数小 9.2%。Grid-0.3 栅在 30° 、 45° 和 60° 倾角时, 分别比无栅栏网囊的平均横向缩结系数小 8%、8.8% 和 10.7%。Grid-0.4 栅网囊的平均横向缩结系数为 (0.202 ± 0.052), 网目平均张开角度为 ($23^\circ\pm 6^\circ$), 比无栅栏网囊的平均横向缩结系数大 3.3%。Grid-0.5 栅网囊的平均横向缩结系数最大, 为 (0.233 ± 0.065), 网目平均张开角度为 ($26^\circ\pm 7^\circ$), 比无栅栏网囊的平均横向缩结系数大 18.8%。Grid-0.5 栅在 30° 、 45° 和 60° 倾角时, 分别比无栅栏网囊的平均横向缩结系数大

18.4%、17.3% 和 20.8%, 使网囊网目张开程度变大。添加定量模拟渔获物后, 网囊的横向缩结系数变化趋势为由大变小, 在网囊中部横向缩结系数最小, 然后横向缩结系数开始缓慢增加, 网囊末端的横向缩结最大。无栅栏有渔获物网囊的最大横向缩结系数为 0.417, 网目张开角度为 49.28° 。

2.3 不同规格和倾角的栅栏对网囊形态变化影响

图 6 为 $V=0.7$ m/s 时网囊侧面轮廓形态。为了描述栅栏对网囊形态的影响, 下文的“网囊周长”均指栅栏前后端中间 (网囊头部) 的平均网囊周长。设置不同规格和倾角的栅栏使网囊头部网衣发生不同程度的扭曲和形变。在相同规格栅栏条件下, 设置不同栅栏倾角的网囊下垂程度相一致。Grid-0.3 栅使网囊头部上端出现凹陷, 周长减少, 网囊整体变扁。当倾角为 30° 和 60° 时, 周长较无栅栏网囊分别减少了 2.7% 和 1.3%。Grid-0.4 栅与网囊头部的上下两端有很好的贴合, 有较好的流线型。栅栏倾角为 30° 、 45° 和 60° 时, 周长较无栅栏网囊分别扩大了 14.4%、21% 和 27.3%。Grid-0.5 栅对网囊头部有扩张作用, 使网囊上下端出现凸点, 增大了网囊周长, 网囊整体变宽。倾角为 30° 、 45° 和 60° 时, 周长较无栅栏网囊分别扩大了 17.9%、46.5% 和 52.7%。在栅栏倾角相同的条件下, 设置不同栅栏规格的网囊呈现出不同程度的下垂, 下垂程度从大到小依次为 Grid-0.5 栅>Grid-0.4 栅>Grid-0.3 栅。从网囊形态角度来看, 栅栏规格的影响要比倾角影响程度大。在添加模拟渔获物后, 网囊下垂程度加大。网囊由于渔获物的堆积呈现中间窄, 前后端两边宽的现象。栅栏规格越大, 网囊中部周长越大。

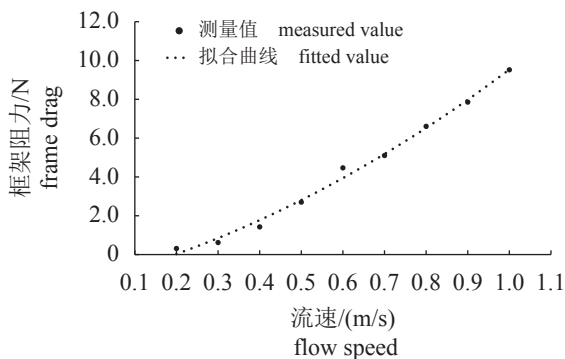


图 4 框架阻力与流速关系

Fig. 4 The relationship between frame drag and flow speed

2.4 不同规格和倾角的栅栏对网囊阻力的影响

图 7 为消除刚性框架阻力后, 网囊设置不同规格和倾角的栅栏后阻力与流速之间的关系。网

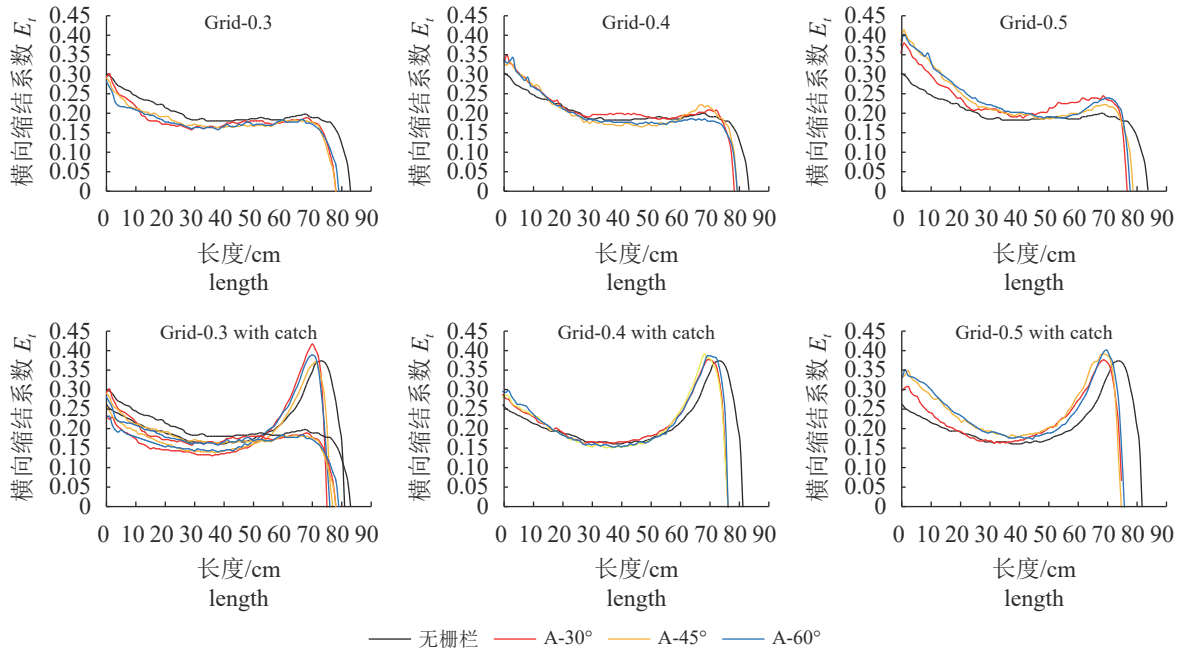


图 5 网囊不同部位的横向缩结系数变化

Fig. 5 The variation of the hanging ratio E_t in different parts of codend

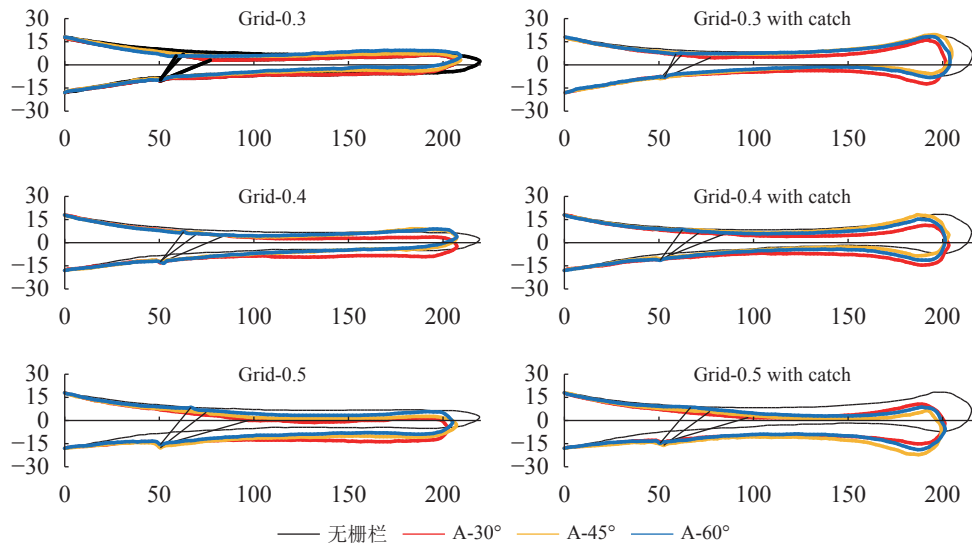


图 6 不同栅栏倾角和规格对网囊轮廓的影响

左: 无渔获物; 右: 有渔获物。

Fig. 6 The influence of different grid angle and size of grid on the shape of codend

Left: the empty codend; right: the codend with catch.

囊阻力随流速的增加而增大, 阻力和流速呈幂函数关系上升。在相同倾角条件下, 网囊阻力随着栅栏规格的增大而增加, 网囊阻力从大到小依次为 Grid-0.5 栅>Grid-0.4 栅>Grid-0.3 栅, 而无栅栏网囊的阻力最小。设置 Grid-0.3 栅的网囊, 不同倾角下的阻力差异较小, 与无栅栏的网囊阻力相近。设置 Grid-0.4 栅的网囊, 在倾角 60°时阻力最大, 比无栅栏网囊的阻力大 32%, 而倾角为 30°

和 45°时的阻力与无栅栏网囊的阻力相近, 阻力分别比无栅栏网囊的阻力大 2.4% 和 3.8%。而设置 Grid-0.5 栅的网囊, 在不同倾角下的阻力均大于无栅栏网囊的阻力。倾角为 30°、45°、60°时, 阻力分别比无栅栏网囊大 22.5%、21.9% 和 28.75%。

图 8 为设置 9 种不同栅栏类型的网囊的平均阻力。虚线为无栅栏网囊空网时的阻力, 实线为无栅栏网囊有模拟渔获物时的阻力, 用增幅比来

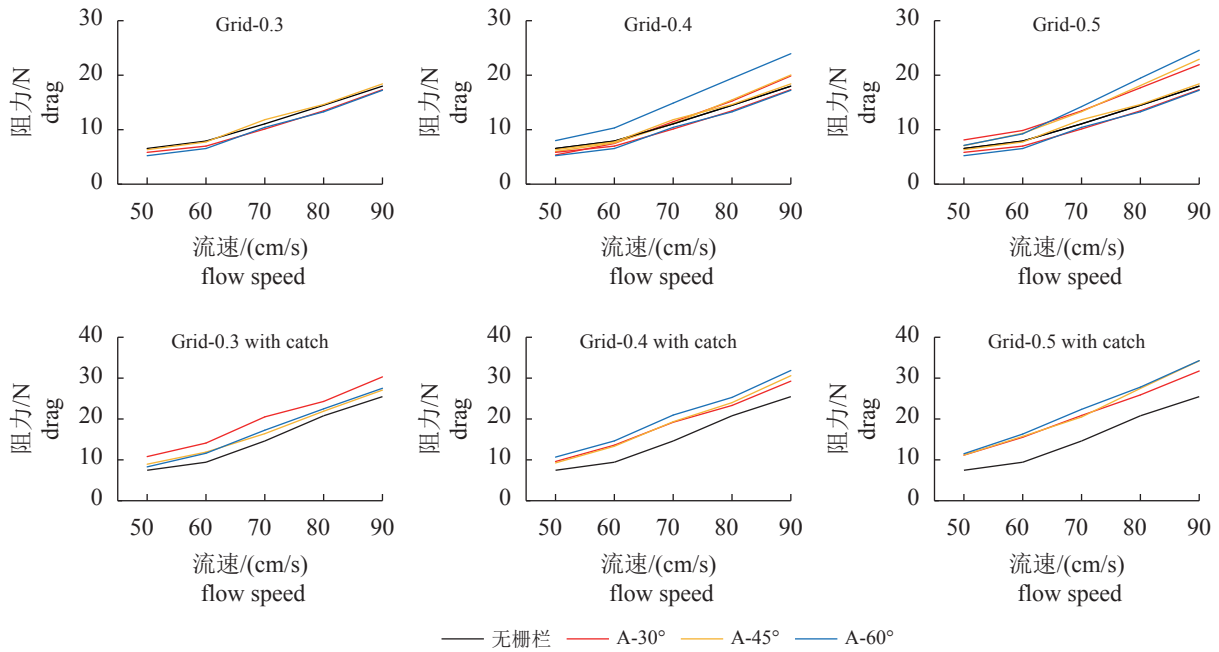


图 7 栅栏倾角和规格对网囊阻力的影响

上: 无渔获物; 下: 有渔获物。

Fig. 7 The influence of grid angle and size of grid on the drag of codend

Up: the empty codend; down: the codend with catch.

表示改变栅栏后网囊的阻力变化。无栅栏网囊, 有模拟渔获物时阻力比空网大 32%。无模拟渔获物时, 以不同倾角设置 Grid-0.4 栅和 Grid-0.5 栅的网囊, 平均阻力分别比无栅栏网囊大 12.7% 和 24.4%。以 30°、45° 和 60° 倾角设置不同规格栅栏的网囊, 其平均阻力分别比无栅栏网囊的阻力大 5%、9% 和 17%, 网囊阻力随着倾角增大而增加。

设置模拟渔获物后, 所有类型的网囊阻力都增加。除 Grid-0.3-A-30° 外, 其它栅型 BRD 的网囊阻力均随栅栏倾角和规格的增大而增加。

3 讨论

3.1 栅栏规格和倾斜角度的设置

栅栏作为栅型 BRD 的重要组件, 其规格和倾斜角度会影响网具结构、逃逸口大小、安装难易程度等, 而且会影响装置系统的水动力性能。刚性栅栏规格由栅栏所处部位的网囊周长决定的, 合适的栅栏尺寸应对其周围网目起到横向扩张的作用^[1]。Grimaldo 等^[17]认为, 规格较大的栅型 BRD 对海龟及其它哺乳动物释放效果更佳, 主要在于其过滤区域更大, 有利于鱼类选择; 并认为栅栏周长应为网囊横向拉直周长的 52%~75%。Broadhurst 等^[18]研究发现, 栅栏周长等于网囊拉直周长的 0.35 倍 (横向缩结系数为 0.35) 时性能最佳, 并建议应尽量减小栅栏倾角, 进而增大过滤面积。本实验通过对比发现, 栅型 Grid-0.4 时, 网囊轮廓形态最佳, 网囊网目张开角度略有增大, 有利于幼鱼的释放。本研究认为网囊横向缩结系数为 0.4 时栅栏性能最佳, 结果较大于 Broadhurst 等^[18]的研究结果, 原因可能与研究方法、试验设

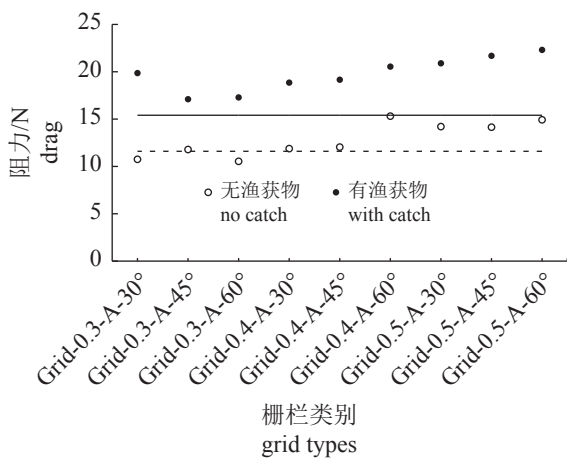


图 8 设置不同栅栏类别的网囊阻力

实线为无栅栏网囊空网时的阻力, 虚线为无栅栏网囊有模拟渔获物时的阻力。

Fig. 8 The drag of codends with different grid types

The solid line is drag of Grid-free codend without catch the dotted line is drag of Grid-free codend with catch.

置、网囊特征、模型制作和材料等因素有关。作者根据研究结果认为, 规格较大的栅栏性能较佳, 原因可能在于大规格栅栏可配置较大逃生口, 更有利于释放大型海洋动物, 同时不易被渔获物或杂质所堵塞, 并且进入网囊的渔获物距逃生口较远, 降低了渔获物的损失风险。

栅栏倾角与栅栏规格成反比, 倾角越小, 所需要的栅栏越长; 栅栏倾角越大, 流经栅栏的水流速度越大, 进而鱼类个体随水流通过栅栏的概率也高^[7]。Eayrs 等^[1]研究表明, 栅栏倾角过大, 其更容易被进入网具的生物堵塞, 增加了目标渔获物损失风险; 倾角过小会导致逃生口密封效果不佳, 导致虾类从逃逸口逃脱; 因此他建议虾拖网中栅栏的最佳安装角度为 45°~60°之间。Isakson 等^[8]认为, Nordmøre 栅栏倾角低于 35°和高于 50°, 都会导致虾类 (*Pandalus borealis*) 逃逸或栅栏堵塞。其他学者根据模型试验发现, 在栅栏前、后水体的流态相差较大, 由于栅栏的阻挡导致栅栏前面存在部分上升流, 水流的上升力随着栅栏倾角的增大而增强。同时由于栅栏受力面积的增加, 导致栅栏抖动情况严重, 不仅惊吓到鱼类, 影响通过率, 也可能造成鱼体损伤^[9]。本实验发现设置 Grid-0.4 栅栏倾角为 30°和 45°时网囊轮廓最佳, 对网囊阻力影响最小。因此, 倾角的设置应该考虑以下两个方面: 其一, 栅栏倾角应该考虑目标鱼种、副渔获物的游泳能力强弱、作业环境等因素。其二, 不同倾角的栅栏会产生不同的水动力性能, 设置的水动力性能应在不损失目标鱼种的前提下, 尽可能的减少副渔获物, 并降低重量, 减少阻力。

除了栅栏倾角和规格外, 栅栏材质、栅条形状、栅条间距也会影响到栅型 BRD 的水动力性能。柔性栅栏重量要比刚性栅栏轻、取材方便对网具结构影响较小, 在很多拖网渔业中被采用。根据纺锤体物体在水中阻力较小的流体动力学原理, 采用圆形、椭圆性的栅条, 不仅具有更佳的水动力性能, 而且可以降低栅栏抖动, 降低鱼体损伤率^[12]。Grimaldo 等^[17]认为, 相同尺寸, 栅栏的面积系数 (栅栏实际投影面积与栅栏外框架尺寸虚构面积之比) 越小, 则过流流速越大, 进入网具的渔获物随水流穿越栅栏的概率也越大。

3.2 栅型 BRD 对网囊阻力和形态的影响

栅型 BRD 通常设置在网身与网囊连接处或

者网囊前部区域, 因为这是渔获物最集中的区域, 也是对进入网具的鱼类进行选择的最佳位置。Beverton 等^[19]调查证明, 鱼类主要从网囊头部和底端逃逸, 并非中部。日本和我国台湾地区有关科研人员的试验表明, 网囊中鱼类的逃逸现象 80% 发生在网囊头端及网囊末端^[20]。这主要是由于鱼类在被捕捞前期, 鱼类可从网囊末端网目逃脱。随着网囊中渔获物的增加, 网囊末端网目的堵塞, 网囊形状也逐渐变为球形。此时, 网囊中部由于前后拉伸导致网目闭合, 阻碍了鱼类逃逸。因此, 鱼类的逃逸大多发生在网囊的前端或网囊末端渔获物前。当在网囊前端设置栅型 BRD 后, 非目标鱼种可沿栅栏通过逃逸口逃出拖网, 目标鱼种则随水流穿过栅栏进入网囊^[10]。通过观察鱼类在网囊内的行为反应发现, 鱼类由于恐慌会试图通过网目逃逸, 部分会被挤出网囊, 部分则强行穿过网囊, 这均会降低逃逸鱼类的存活率。而加入刚性栅栏后, 鱼群可通过栅栏撑开的网目逃脱。张健等^[7]认为, 由于刚性栅栏的支撑使网囊网目张开较大且形状稳定, 有利于幼体的逃逸。

刚性栅栏的设置在一定程度上会对网囊水动力及其形态产生影响, 但尚未见到有关量化影响的研究报道。Eayrs 等^[1]认为, 在网囊设置栅栏不会对网囊阻力产生明显的影响, 可能主要因为栅栏阻力增加值和网囊阻力减小值相互抵消: 第一, 栅栏提高了网囊横向扩张, 提高网囊滤水性, 从而减少了压差阻力; 第二, 栅栏后的湍流可以降低渔获物前部区域的高压, 减少阻力。本试验量化了不同栅栏规格和不同倾角对网囊阻力的影响, 总体上网囊阻力随栅栏规格和倾角的增大而增加, 栅栏规格对网囊阻力的影响程度比倾角大。在网囊上设置栅栏不仅撑开了网囊迎流面积, 而且会增加栅栏附加网片的入射角, 另外栅栏自身也产生一定的阻力, 这些因素均会增大整个网囊水阻力。FERRO 等^[21]研究发现, 网囊迎流面积是影响网囊阻力的重要因素, 网囊阻力会随着网囊迎流面积增加而增大。Buxton 等^[22]通过模型试验证明网具阻力会随着网片入射角增加而增大。

扩张网囊网目也是提高拖网渔具选择性的有效方法, 调整网目尺寸和结构是改善网囊尺寸选择性的的重要因素^[2]。根据网囊中渔获物的逃逸行为, 方形网目和转向网目具有更好的选择性。因为在水流的作用下, 这两种网目较传统菱形网目不易闭合, 网目张开程度更大, 幼鱼逃逸率和成

活率较高^[23]。庄鑫等^[24]认为, 网囊网目缩结对虾类选择性有影响, 增大网囊横向缩结系数意味着网目由接近闭合的状态逐渐横向张开, 提高了幼体的逃逸率。网片是柔性体, 安装栅型 BRD 会对网囊形态及网目扩张会造成改变。本实验发现, 不同规格和倾角的栅栏对网囊影响程度不同。设置 Grid-0.3 栅栏的网囊, 其横向缩结系数比无栅栏网囊小, 网目张开程度小, 不利于幼鱼及其他小型鱼类释放。而设置 Grid-0.4 和 Grid-0.5 栅栏的网囊的横向缩结系数比无栅栏网囊大, 对网囊网目有扩张作用, 有利于幼鱼的逃逸, 但设置 Grid-0.5 栅栏的网囊轮廓不平滑, 不仅会增加上下网期间网具的磨损, 还由于重量大、阻力大, 不利于安装和操作。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Eayrs S. A guide to bycatch reduction in tropical shrimp-trawl fisheries. revised edition[M]. Rome: FAO, 2007: 108.
- [2] Perez Roda M, Gilman E, Huntington T, *et al.* A third assessment of global marine fisheries discards[M]. Rome: FAO, 2019: 78.
- [3] 孙满昌. 渔具渔法选择性 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- Sun M C. Selection of fishing gear and fishing method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014 (in Chinese).
- [4] 张健, 孙满昌. 欧洲地区选择性虾拖网渔具的研究进展[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(1): 55-62.
- Zhang J, Sun M C. Progress in research on selective shrimp trawls in Europe[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(1): 55-62 (in Chinese).
- [5] 王忠秋. Y 型幼鱼释放装置在东海近海张网渔业中的应用研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- Wang Z Q. Application study of Y-shaped juveniles exclusion devise in the East China Sea offshore stow net fisheries[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017 (in Chinese).
- [6] 唐衍力, 梁振林, 万荣. 拖网中副渔获物分离栅的研究进展[J]. 大连水产学院学报, 2003, 18(4): 301-306.
- Tang Y L, Liang Z L, Wan R. Progress of studies on trawl sorting grids[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2003, 18(4): 301-306 (in Chinese).
- [7] 张健, 石建高, 张鹏, 等. 桁拖网渔具刚性栅栏对虾类的分隔性能[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(6): 726-733.
- Zhang J, Shi J G, Zhang P, *et al.* Separating performance for shrimps of sorting grid rigged in beam trawls[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(6): 726-733 (in Chinese).
- [8] Isaksen B, Valdemarsen J W, Larsen R B, *et al.* Reduction of fish by-catch in shrimp trawl using a rigid separator grid in the aft belly[J]. *Fisheries Research*, 1992, 13(3): 335-352.
- [9] Winger P D, Eayrs S, Glass C W. Fish behavior near bottom trawls[M]//He P G. Behavior of marine fishes: capture processes and conservation challenges. Ames: Blackwell Publishing Ltd, 2010.
- [10] 张健, 张鹏, 孙满昌, 等. 桁拖网渔具刚性栅栏对鱼类的分隔效率研究[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(4): 511-517.
- Zhang J, Zhang P, Sun M C, *et al.* Fish separating efficiency of sorting grid rigged in beam trawls[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(4): 511-517 (in Chinese).
- [11] 冯春雷, 徐国栋, 黄洪亮, 等. 桁杆虾拖网圆形分隔装置的效果分析[J]. *海洋渔业*, 2011, 33(1): 91-98.
- Feng C L, Xu G D, Huang H L, *et al.* Efficiency analysis on the circular separator device for shrimp beam trawl[J]. *Marine Fisheries*, 2011, 33(1): 91-98 (in Chinese).
- [12] Grimaldo E. The effects of grid angle on a modified Nordmøre-grid in the Nordic Shrimp Fishery[J]. *Fisheries Research*, 2006, 77(1): 53-59.
- [13] Graham N, Fryer R J. Separation of fish from *Nephrops norvegicus* into a two-tier cod-end using a selection grid[J]. *Fisheries Research*, 2006, 82(1-3): 111-118.
- [14] Riedel R, DeAlteris J. Factors affecting hydrodynamic performance of the Nordmøre grate system: a bycatch reduction device used in the Gulf of Maine shrimp fishery[J]. *Fisheries Research*, 1995, 24(3): 181-198.
- [15] Parsons G R, Foster D G. Swimming performance and behavior of red snapper: their application to bycatch reduction[M]//Patterson III W F, Cowan J H Jr, Fitzhugh G R, *et al.* Red snapper ecology and fisheries in the US. Gulf of Mexico. Bethesda: American Fisheries Society, 2007: 59-75.

- [16] Liu W, Tang H, You X X, *et al.* Effect of cutting ratio and catch on drag characteristics and fluttering motions of midwater trawl codend[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(3): 256.
- [17] Grimaldo E, Larsen R B. The cosmos grid: a new design for reducing by-catch in the Nordic shrimp fishery[J]. *Fisheries Research*, 2005, 76(2): 187-197.
- [18] Broadhurst M K, Young D J, Damiano C. Effects of Nordmøre-grid angles, profiles and other industry-developed modifications on catches in an Australian penaeid-trawl fishery[J]. *Ciencias Marinas*, 2004, 30(1B): 155-168.
- [19] Robertson J H B, Stewart P A M. A comparison of size selection of haddock and whiting by square and diamond mesh codends[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1988, 44(2): 148-161.
- [20] Huang T S, Chow Y S. The effect of trawl codend design on selection characteristics[J]. *Journal of the Fisheries Society of Taiwan*, 1992, 19(2): 103-114.
- [21] Ferro R S T, Stewart P A M. The drag of nylon codends[J]. *Fisheries Research*, 1987, 5(4): 331-347.
- [22] Buxton N G, DeAlteris J T. Quantification of water flow and net drag in midwater trawls[J]. *Fisheries Research*, 1993, 16(2): 165-178.
- [23] 张健, 孙满昌. 桁拖网不同网目结构的网囊对虾类的选择性[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(4): 667-676.
- Zhang J, Sun M C. Size selectivity of codends with different mesh configuration for shrimps in Chinese beam trawl fishery[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(4): 667-676 (in Chinese).
- [24] 庄鑫, 张国胜, 李敬尧, 等. 网目缩结对盘锦海域桁杆虾拖网网囊的选择性影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2018, 33(1): 95-101.
- Zhuang X, Zhang G S, Li J Y, *et al.* Selectivity influence of change in mesh hanging ratio on cod-end of beam shrimp trawl in coastal area of Panjin, Liaoning Province[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, 33(1): 95-101 (in Chinese).

Effects of size and grid angle of sorting grid on the hydrodynamic performance and shape of trawl codend

YIN Liqiang¹, TANG Hao^{1,2,3*}, XU Liuxiong^{1,2,3}, LIU Wei¹,
LIU Jingbin¹, SUN Qiuyang¹, ZHANG Feng¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fishery, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Reducing trawl bycatch rates on non-target species is a hot topic in fisheries science. The sorting grid is widely used in trawl fisheries to reduce bycatch and improve trawl selectivity. The change in hydrodynamic force of the bycatch reduction device influences the behavioral response of fish after contact, determining the device's separation efficiency and selectivity. Therefore, understanding the hydrodynamic performance of the bycatch reduction device is critical for improving the selectivity of trawl gear. This study investigated the effects of grid sizes (Grid-0.3, Grid-0.4 and Grid-0.5) on the mesh opening degree, spatial geometry, and drag of codend under three different grid angles (A-30°, A-45° and A-60°) using flume tank experiment. The results showed that: (1) The average mesh opening angle of codend without grid was 22°±5°. The average mesh opening angle of the codend with Grid-0.4 and Grid-0.5 was 3.3% and 18.8% respectively, greater than that of the codend without grid, while the mesh opening angle of the codend with Grid-0.3 was 9.2% lower than that of the codend without grid. (2) Grid-0.4 has the least influence on the codend shape and was streamlined to accommodate it, while Grid-0.3 and Grid-0.5 distorted the codend. (3) The differences in the drag of the codend with Grid-0.3 at different grid angles were small with an average similar to that of the codend without grid. The average drag of codend with Grid-0.4 and Grid-0.5 at different grid angles was 12.7% and 24.4% greater than that of the codend without grid, respectively. Except for the codend with Grid-0.3 at A-30°, the codend drag increased with increasing grid angle and size. The findings could have a significant impact on the research on bottom trawl selectivity and the protection of demersal fishery resources in China, particularly research on devices that can effectively release bycatch and juvenile fish.

Key words: sorting grid; drag; shape; specification; grid angle

Corresponding author: TANG Hao. E-mail: htang@shou.edu

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31902426); Shanghai Sailing Program (19YF1419800)