

## 网线直径和模拟渔获物对拖网网囊水阻力及形态影响

唐浩, 张馨茹, 朱安然, 刘伟, 孙秋阳, 张锋, 朱美熹, 许柳雄

## Effects of twine diameter and catch on drag and configuration of trawl codend

TANG Hao, ZHANG Xinru, ZHU Anran, LIU Wei, SUN Qiuyang, ZHANG Feng, ZHU Meixi, XU Liuxiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20220303774>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 基于多元变量的南极磷虾拖网作业状态影响因素分析

Factors influencing the trawling status of Antarctic krill fishery based on multivariate analysis

上海海洋大学学报. 2021, 30(1): 144 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191202879>

#### 帆张网网囊网目尺寸对带鱼的选择性

Selectivity of different mesh size codends of canvas spreader stow net for *Trichiurus lepturus*

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 866 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200703093>

#### 黄茅海河口张网网囊网目对凤鲚的选择性研究

Study on the selectivity of codend mesh of stow net for *Coilia mystus* in Huangmaohai Estuary

上海海洋大学学报. 2018, 27(2): 274 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170902145>

#### 基于局部附网法的南极磷虾拖网网身大网目选择性

Selectivity of Antarctic krill trawl body with large mesh using local-attached fine mesh net method

上海海洋大学学报. 2021, 30(4): 735 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200402995>

#### 网围养蟹对浮游植物群落结构变化的影响

Effect of pen crab farming on phytoplankton community structure

上海海洋大学学报. 2019, 28(2): 237 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180302254>

## 网线直径和模拟渔获物对拖网网囊水阻力及形态影响

唐浩<sup>1,2,3</sup>, 张馨茹<sup>1</sup>, 朱安然<sup>4</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 孙秋阳<sup>1</sup>, 张锋<sup>1</sup>, 朱美熹<sup>1</sup>,  
许柳雄<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 上海海洋大学海洋文化与法律学院, 上海 201306)

**摘要:** 为探究网线直径和渔获物对拖网网囊水阻力及形态的影响, 利用上海海洋大学循环水槽对 3 顶不同网线直径(1.11 mm、0.96 mm、0.54 mm)的网囊结构在 5 种流速(0.5 m/s、0.6 m/s、0.7 m/s、0.8 m/s、0.9 m/s)和 2 种渔获状态(空网、存在模拟渔获物)下进行试验, 比较分析各条件下网囊形态、水阻力和横向缩结系数的变化。结果表明:(1)空网条件下, 网囊阻力系数随网线直径的增大而增大; 随雷诺数的增加, 阻力系数呈减小的趋势。(2)网囊水阻力与流速、网线直径和渔获量呈正相关关系。(3)存在模拟渔获物网囊随着网线直径的增大, 中部宽度增大; 随着流速的增加, 网囊长度的增加较空网网囊更为明显; 空网网囊整体形态较饱满。(4)空网网囊横向缩结系数先减小后趋于平缓, 而存在模拟渔获物网囊横向缩结系数先减小后增至最大。研究结果可为改善拖网网囊水动力性能, 提高渔具的作业特性及选择性提供科学基础依据。

**关键词:** 网囊; 网线直径; 渔获物; 阻力; 形态

**中图分类号:** S 972.1      **文献标志码:** A

拖网捕捞是海洋捕捞中最主要的作业方式之一, 其渔获产量约为世界海洋捕捞总产量的 35%<sup>[1-2]</sup>。拖网是一种主动式过滤性渔具<sup>[3-4]</sup>, 作业方式主要通过单船或双船拖曳网具水平扫过水体, 驱使鱼虾进入网内, 最终聚集在网囊部位, 从而达到捕捞目的。

拖网网囊位于渔具末端, 起到聚集和储存渔获物的作用<sup>[5-6]</sup>。因此, 网囊结构具有网线直径大、网目尺寸小、网线强度高特点。另外, 网囊也是整个拖网系统中的“平衡器”, 对保持整个网具稳定作业起重要作用。网具水动力特性是评价渔具物理及渔获性能的重要指标, 网囊水阻力和形态的变化不仅决定着拖网系统的水动力特性和稳定性, 还会影响渔具选择性捕捞效果。O'NEILL 等<sup>[7]</sup>通过理论分析发现, 渔获物的堆积会导致网囊前部网目闭合, 尾部形态隆起, 水阻力变大; HERRMANN 等<sup>[8]</sup>研究发现, 改变渔获量会影响网囊底部的形状, 渔获物在网囊后部堆积

会导致网囊底部呈现饱满的球形形态; MILLAR 等<sup>[9]</sup>提出, 拖网网具选择性主要发生在网囊部位; PRIOUR<sup>[10]</sup>比较分析了 T0 和 T90 网囊形态变化, 发现改变网目结节方向会造成网囊的形状变化, T90 网囊相较于 T0 网囊形状更为平滑, 且网囊中段没有明显的收缩, 更有利于幼鱼逃逸; GRIMALDO 等<sup>[11]</sup>通过水下视频观测发现设置升力板可提高拖网网囊选择性; TANG 等<sup>[12]</sup>利用六分力角度仪改变无结聚乙烯网片的冲角并获得不同冲角下的水动力系数, 发现无结聚乙烯网片的倾斜阻力系数与冲角呈正相关, 即阻力系数随着冲角的增大而增大; 冯春雷等<sup>[13]</sup>通过对南极磷虾拖网结构优化设计与网具性能试验, 发现大网目网具能够滤过更多水体, 可降低阻力; LIU 等<sup>[14]</sup>通过动水槽试验发现, 相同流速条件下, 网囊阻力随剪裁斜率的减小而减小。

网囊的水阻力、形态和选择性受渔获物、网衣结节方向、网衣冲角、网目尺寸和剪裁斜率等

收稿日期: 2022-03-16

修回日期: 2022-04-25

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

作者简介: 唐浩(1988—), 男, 博士, 研究方向为渔具渔法。E-mail: htang@shou.edu.cn

多因素影响。其中,增大网线直径是提高网囊强度的重要手段,但同时也会增加网囊水阻力。增大网线直径是否会影响网囊形态,进而影响网囊选择性尚不明晰。此外,累积在网囊内的渔获物对网囊水动力特性的影响规律也需进一步查证。为此,选取 3 顶不同网线直径的网囊结构,设置空网及存在模拟渔获物 2 种状态,比较分析在不同流速条件下网囊水动力性能的差异,探究网线直径和渔获物对网囊水阻力、形态和横向缩结系数的影响规律,以期今后通过改善中层拖网网囊水动力性能来提高渔获选择性研究奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验网囊

试验采用 3 顶网线直径不同的聚乙烯(PE)网囊,均为四片式结构。由梯形(前)和矩形(后)网片两部分组成(Part 1 和 Part 2):Part 1 由网线直径为 0.96 mm,18 目×12 目的两侧边剪裁斜率为 4:1 的梯形网片构成;Part 2 由不同网线直径(1.11 mm、0.96 mm、0.54 mm),12 目×38 目的矩

形网片构成(图 1)。每组网片连接利用绕缝方式进行缝合,因网囊局部结构简化需要,把绕缝线作为力纲,未单独装配绳索。网囊口以绕缝方式装配到刚性框架上,缩结比为 0.39,选用囊底纲连接封闭网囊末端。网囊采用菱形网目,纵向使用,称为 T0 网目。具体参数见表 1。

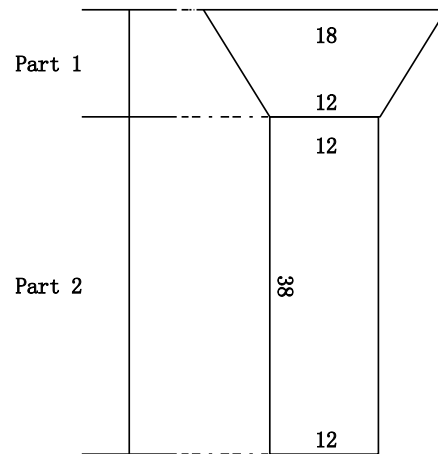


图 1 网囊的参数及缝合方式

Fig.1 Parameter and combine method of codend

表 1 试验网囊具体参数

Tab.1 Specifications of test codend

网囊 Codend	网线材料 Twine materials	网目尺寸 Mesh size/mm	网线直径 Twine diameter/mm	剪裁斜率 Cutting ratio	结节方向 Knot direction	网囊长度 Codend length/mm
Part 1	PE	40	0.96	4:1	T0	480
Part 2	PE	40	1.11	无剪裁	T0	1 500
	PE	40	0.96	无剪裁	T0	1 500
	PE	40	0.54	无剪裁	T0	1 500

### 1.2 水槽和仪器

网囊模型试验在上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心循环动水槽中进行,水池主尺度:9 m(长)×3.5 m(宽)×2 m(深);水槽侧面为钢化玻璃观测窗,在其正前方约 5 m 处定点放置像素为 1 920×1 080 的相机,用于观察和记录试验过程中网囊的形态变化;为精确测量网囊水阻力,且尽量保证测试框架阻力低于网囊水阻力,采用圆形刚性框架进行网囊水阻力测定,网囊所受水阻力大小等于装配网囊的框架总阻力减去空框架阻力。试验将网囊网口绕缝在刚性框架上,刚性框架安装在六分力(Denshikogyo

Co., Japan)仪器上,记录阻力数据的频率设置为 100 Hz。六分力仪器正前方 1.2 m 处设置用于测量水流速度的流速计,本试验共设置 5 种流速条件,分别为 0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 m/s。试验期间水温保持在 17.6~18.4 °C,各仪器设备安装具体情况见图 2。

在模拟渔获物对网囊水阻力和形态的影响试验中,采用 50 个注水乒乓球模拟渔获物,随机选择 10 个乒乓球,采用精度为 0.01 cm 的游标卡尺测其直径平均值,并获得其直径为(4.20±0.11) cm。注水乒乓球密度与水槽中的水密度相同,约为 1×10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>。

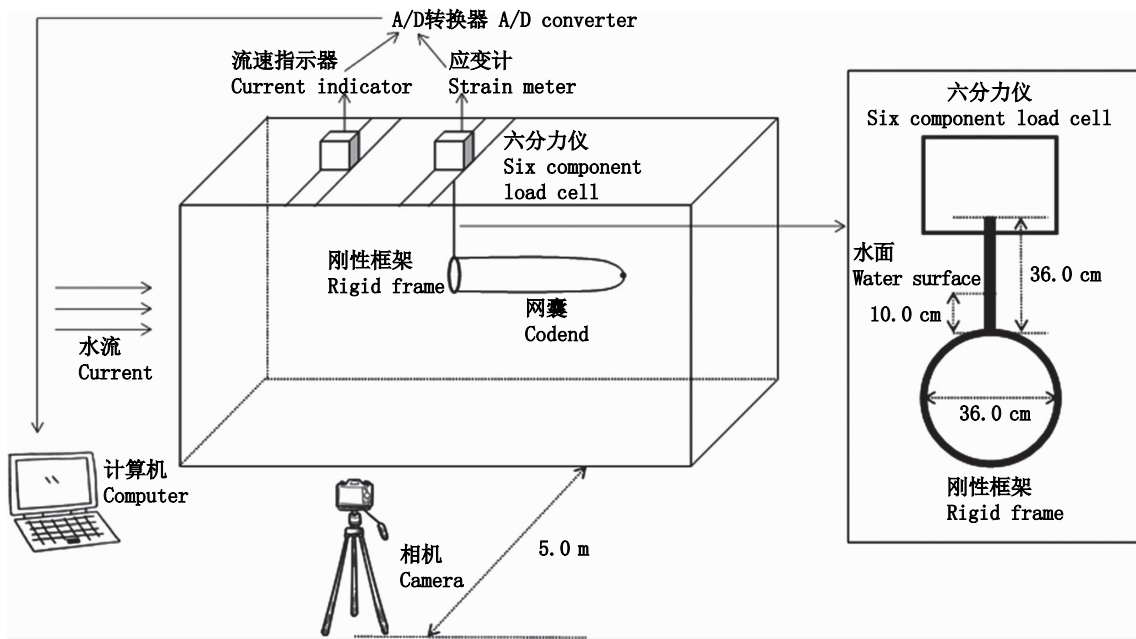


图 2 动水槽及试验装置

Fig.2 Flume tank and experiment equipment

1.3 试验流程

试验分为 2 个部分:第 1 部分为测量空网条件下网囊水阻力和形态,第 2 部分则在第 1 部分测试的基础上增加模拟渔获物。

试验开始前,首先对刚性框架阻力值进行测量,将刚性框架安装至六分力仪器,并使刚性框架平面与水流方向垂直,将其没入水中(刚性框架标准杆入水 10.0 cm),待流态基本稳定后,测量不同流速条件下框架的阻力(流速为 0.3 ~ 1.1 m/s,流速间隔为 0.1 m/s),并记录刚性框架 10 s 的阻力数据(1 000 数据),最终取平均值。

第 1 部分试验:将安装网囊的刚性框架组装到六分力仪器上,然后把刚性框架插入水中,调

整流速到设定值,待网囊展开,形态基本稳定后,记录网囊阻力数据,并使用观测窗正前方的相机拍摄网囊形态。每调节 1 次流速,记录 10 s 阻力数据,拍摄网囊形态。

第 2 部分试验是在第 1 部分试验的基础上,加入模拟渔获物(注水乒乓球),重复第 1 部分试验流程。

1.4 数据提取与分析

1.4.1 数据提取

对拍摄的图片(图 3)应用 GetData Graph Digitizer 软件,将试验设备的位置及特征长度作为标尺,获得网囊节点空间坐标,将参数和坐标值导出,获取网囊形态图片,并进行数据处理,绘制网囊形态变化图。

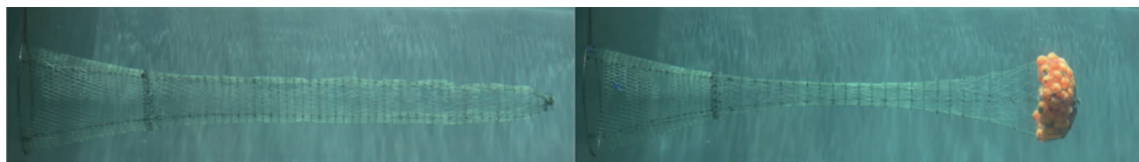


图 3 矫正后相机镜头拍摄的网囊图(左:空网;右:含模拟渔获物网囊)

Fig.3 Camera footage of codend after correction (left: empty codend; right: codend with simulated catch)

### 1.4.2 网囊水阻力系数

由六分力仪记录获取的网囊水阻力  $F$ , 可计算阻力系数  $C_n$ :

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

$$C_n = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \quad (2)$$

式中:  $R_e$  为雷诺数;  $V$  为流速, m/s;  $D$  为特征长度, 取网线直径, m;  $\nu$  为流体运动黏度,  $m^2/s$ ;  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $S$  为网囊的线面积,  $m^2$ 。

### 1.4.3 横向缩结系数

理想状态下, 网囊口为圆形, 横向缩结系数 ( $E_t$ ) 为横向自然长度与网囊横向拉直长度的比值:

$$E_t = \frac{L}{L_0} = \frac{2\pi r}{2\pi R} = \frac{d}{2a} \quad (3)$$

式中:  $L$  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;  $a$  为目脚长度;  $d$  为网目自然横向长度。

## 2 结果

### 2.1 空网网囊水阻力和阻力系数变化

图 4 显示空网网囊水阻力随流速和网线直径的增加而增大。其中, 直径为 1.11 mm 和 0.96 mm 的网囊水阻力较 0.54 mm 的网囊水阻力分别增加了 40.34% 和 25.80%; 3 顶网囊在 0.9 m/s 流速下所受水阻力较 0.6 m/s 时增加了 110.70%。

图 5 为各空网网囊阻力系数与雷诺数的关系。结果显示, 网囊阻力系数随雷诺数的增加呈减小的趋势, 且随着网线直径的增大, 网囊阻力系数增加。

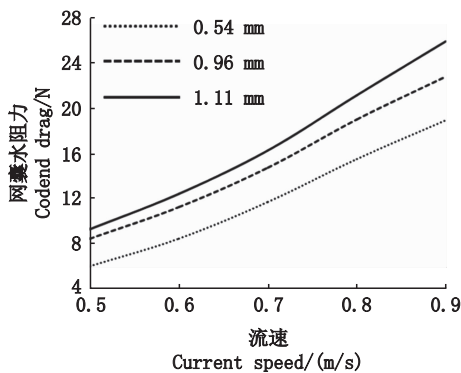


图 4 不同网线直径的空网网囊水阻力与流速的关系  
Fig.4 Relationship between drag of empty codends with different twine diameters and current speeds

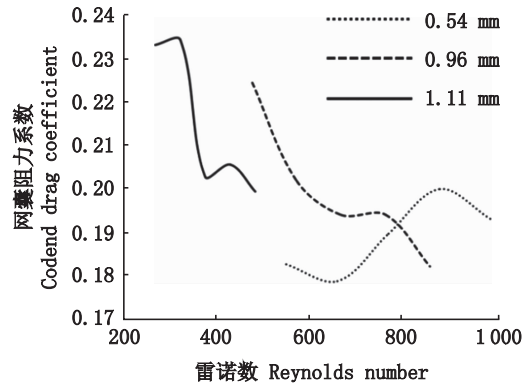


图 5 网囊阻力系数与雷诺数的关系  
Fig.5 Relationship between codend drag coefficient and Reynolds number

### 2.2 含模拟渔获物网囊水阻力变化

相同网线直径条件下, 网囊所受水阻力随流速的增加而增加; 相同流速条件下, 网囊所受水阻力随网线直径的增大而增大 (图 6); 相同网线直径条件及流速条件下, 存在模拟渔获物网囊所受水阻力大于空网网囊所受水阻力。其中, 直径为 1.11 mm 和 0.96 mm 的网囊所受水阻力较直径为 0.54 mm 的网囊所受水阻力分别增加了 11.67% 和 5.75%; 3 顶网囊在 0.9 m/s 流速下水阻力较 0.5 m/s 时分别增加了 1.6 倍 (1.11 mm)、1.8 倍 (0.96 mm)、2.0 倍 (0.54 mm)。当流速为 0.7 m/s 时, 直径为 0.96 mm 的网囊所受水阻力较 0.54 mm 网囊增加了 10.53%; 而当流速大于 0.8 m/s, 各组网囊水阻力差异较小。

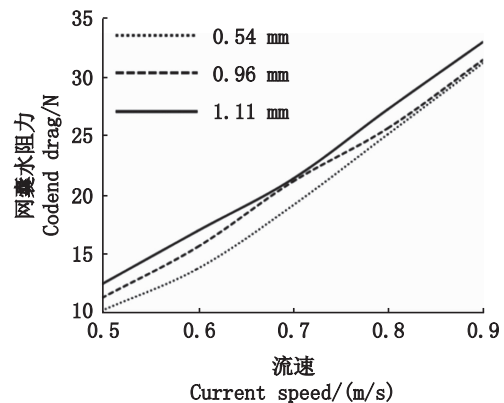


图 6 不同网线直径的含模拟渔获物网囊水阻力与流速的关系

Fig.6 Relationship between drag of codends with simulated catch with different twine diameters and current speeds

### 2.3 空网网囊形态侧视图

根据图像捕捉的节点位置坐标绘制了网囊侧视图(图7),该图对比了不同网线直径的空网网囊在不同流速条件下的形态信息。从图7可发现:不同流速条件下,空网网身始终保持流线型,各段连接平滑,没有出现凹、凸现象。当流速为0.5 m/s时,3顶网囊的展开程度有明显

差别,网囊网衣的展开程度与直径呈反比;当流速为0.6 m/s时,直径为0.54 mm的网囊的展开程度最大,直径为1.11 mm的网囊展开程度略大于直径为0.96 mm的网囊;当速度大于0.7 m/s时,直径为1.11 mm的网囊长度增加了2.02%,3顶网囊的展开程度几乎相同,形态趋于一致。

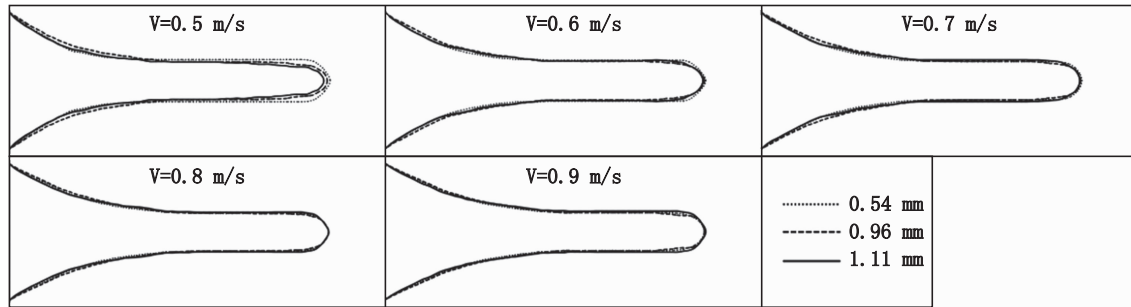


图7 不同流速条件下空网网囊形态侧视图

Fig.7 Side view of shape transformation for empty codends at different current speeds

### 2.4 存在模拟渔获物网囊形态侧视图

图8描述了存在模拟渔获物时,不同网线直径的网囊在0.5~0.9 m/s流速下的形态侧视图。相同流速条件下,直径为0.96 mm和0.54 mm的网囊长度

较1.11 mm的网囊分别增加了3.12%和4.20%,网囊中部宽度分别减少了31.62%和49.82%;随着流速的不断增加,直径为1.11 mm、0.96 mm和0.54 mm的网囊长度小幅增加,分别增加了1.63%、0.65%、1.06%。

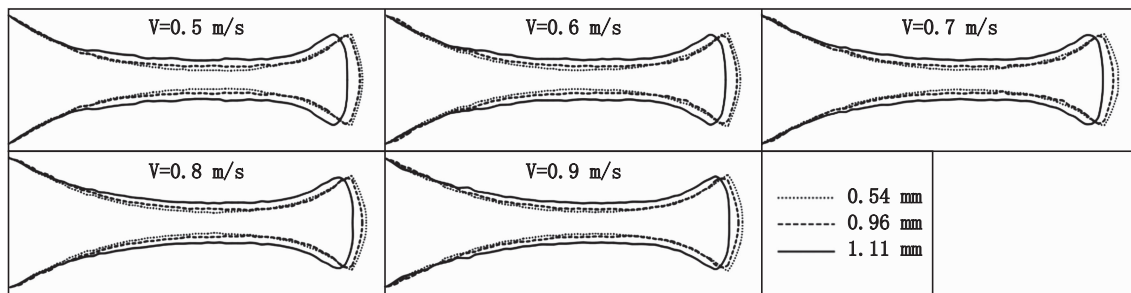


图8 不同流速条件下含渔获物网囊形态侧视图

Fig.8 Side view of shape transformation for codends with simulated catch at different current speeds

### 2.5 空网网囊横向缩结系数变化特点

由于3顶网囊前部(Part 1)结构的网线直径相同,因此仅对后部(Part 2)网囊(43 cm之后部分)横向缩结系数变化进行分析。结果显示,3顶网囊的横向缩结系数在水平方向的变化趋势为

先缓慢下降,后趋于平缓。直径为1.11 mm、0.96 mm和0.54 mm的网囊,横向缩结系数分别在网囊长度(X轴)的49.15%、50.52%和55.48%处趋于平缓。同一顶网囊,流速越大,沿水平方向网目张开程度越小。



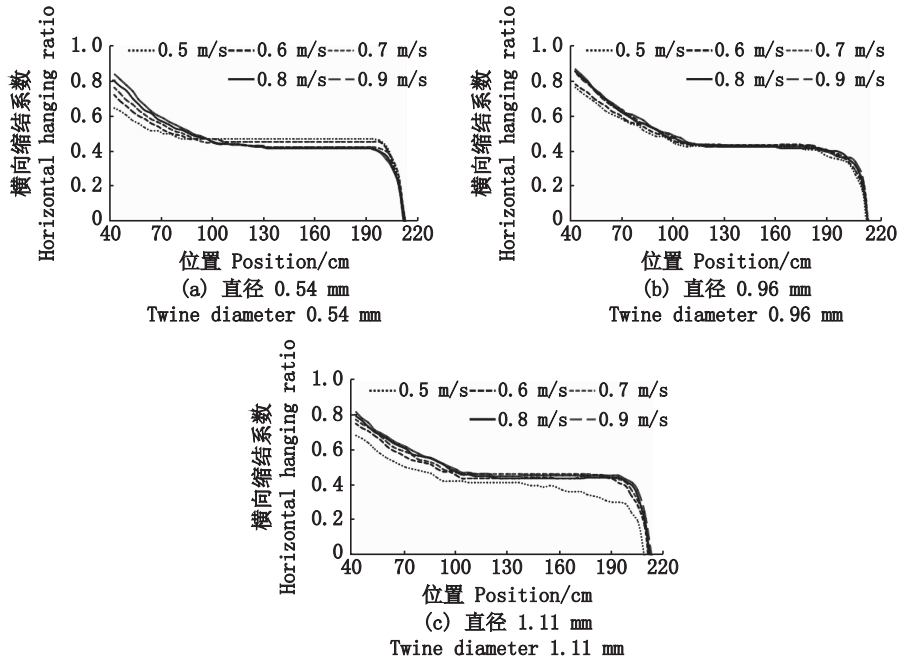


图 9 空网网囊横向缩结系数与长度的关系

Fig.9 Relationship between the horizontal hanging ratio and length of codend without catch

2.6 存在模拟渔获物网囊横向缩结系数变化特点

存在模拟渔获物时,各网囊横向缩结系数与网囊长度的关系见图 10。3 顶网囊的横向缩结系数在水平方向上呈先缓慢下降,再逐步增加至最大值。直径为 1.11 mm、0.96 mm 和 0.54 mm 的

网囊,分别在 21.15%、25.64%、20.28% 处横向缩结系数开始变小;在 57.56%、63.95% 和 56.79% 处时,各横向缩结系数达到最小值,分别约为 0.38、0.26 和 0.19;而在 95.83%、96.21% 和 96.33% 处横向缩结系数达到最大值,分别约为 0.88、0.86 和 0.90。

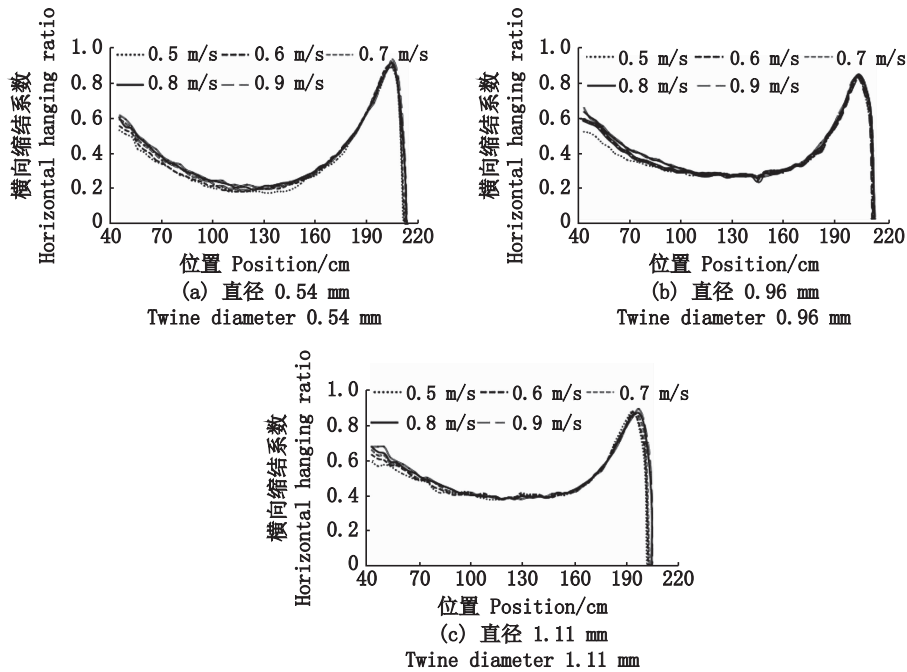


图 10 存在模拟渔获物网囊横向缩结系数与长度的关系

Fig.10 Relationship between the horizontal hanging ratio and length of codend with simulation catch

### 3 讨论

#### 3.1 网囊阻力变化

网具在水下曳行时所受水阻力并非一成不变,网具形状的改变会致使网囊所受海流作用力的分布改变,带来形状与作用力的相互影响。本试验中,各项网囊所受水阻力随流速的增加而增大。THIERRY 等<sup>[15]</sup>利用动水槽试验对不同网线材料、网目尺寸和网口形状的拖网网具性能进行测试,结果显示,网线直径减小和网目尺寸增加,均会导致拖网所受阻力显著降低,且阻力与流速的二次幂成比例。本研究结果表明网囊所受水阻力与流速成幂次关系,说明网囊作为拖网系统的重要部分,其水阻力变化规律与网具整体相似。THIERRY 等<sup>[16]</sup>提出可通过减小网线直径,降低底拖网网具阻力,可提高节能效率。本研究结果显示减小网线直径可减少网囊所受阻力,证实了上述结论。PETRONE 等<sup>[17]</sup>通过对存在模拟渔获物的网囊结构周围速度分布的研究,发现模拟渔获物的存在,造成网囊内水流发生回流(backwater flow),形成压力差,对水阻力产生较大影响。此外,渔获物有从拖网中逃脱的可能性,或阻塞网孔,造成水流被模拟渔获物阻断,增加了网囊所受水阻力。该结论对本研究中存在模拟渔获物的网囊所受水阻力整体大于空网网囊做出了合理解释。

为了降低拖网能耗,有学者提出可以扩大拖网前部网目尺寸,或选用直径较细的网线,通过减少网线的线面积降低网具的阻力<sup>[18-19]</sup>。俞鸿源等<sup>[20]</sup>通过实验发现尼龙单丝拖网、尼龙复丝拖网和超高分子量聚乙烯拖网的阻力均随着速度的增加而增加,并提出网具阻力由网线面积决定。通过网线面积公式计算可知,直径为 1.11 mm、0.96 mm 和 0.54 mm 的网囊线面积分别为 57 081.6 mm<sup>2</sup>、51 609.6 mm<sup>2</sup>和 36 288 mm<sup>2</sup>,相较于直径 0.54 mm 的网囊,直径 1.11 mm 的网囊线面积增加了 57.3%,阻力增大 40.3%,表明阻力增加比例与线面积增加比例相近,印证了网线面积决定着网具阻力,且网线直径越大,线面积越大,网囊所受水阻力越大。本试验在流速增大的过程中,出现了不同网线直径的网囊在同一流速条件下水阻力相差较小的情况,如在 0.8 m/s 时,直径为 0.96 mm 的网囊所受水阻力仅比 0.54 mm

的网囊水阻力增加了 2.03%。虞聪达等<sup>[21]</sup>在对聚乙烯平面网片水动力特性进行研究时指出疏目网为了降低因网线张力大而引起的破网率,可适当增大网线粗度而不会造成网具阻力的明显增加。TANG 等<sup>[22]</sup>研究表明,网片与水流冲角平行时,其水阻力系数与占空率呈负相关关系,且网片前部网线易产生遮蔽效应,造成水阻力下降。本研究中网囊网线直径增加,使网囊的网片占空率增大,前部网片的遮蔽效应影响也越大,可能是造成不同网线直径的网囊水阻力差异表现并不十分明显的原因。今后,应增加属性参数差异较为明显的网囊进一步开展水动力试验,量化分析网线直径对网囊水阻力的影响程度。

网片阻力系数处于自动模型区内,即流态稳定,阻力系数不随雷诺数的变化而变化,则可忽略雷诺数的影响<sup>[21,23]</sup>;然而,当雷诺数较低时,网片阻力系数变化较为明显,不容忽视。陈鹿等<sup>[24]</sup>在动水槽中对 9 种网片的水阻力进行测试时发现网线越粗,阻力系数越快达到稳定;网线越细,达到稳定越慢,这与本试验结果一致。唐浩等<sup>[25]</sup>认为雷诺数是影响网片阻力系数的重要因子,因为雷诺数决定了网片周围的流态,并通过动水槽试验发现尼龙网片的阻力系数与雷诺数存在负相关关系,即阻力系数随着雷诺数的增大而减小,随后逐渐趋于稳定。本试验对不同网线直径的网囊的平均阻力系数与雷诺数的关系进行了研究,发现直径为 1.11 mm 和 0.96 mm 网囊阻力系数随着雷诺数的增加呈先减小后稳定的变化趋势,与之前学者研究结果一致。

#### 3.2 网囊形态

崔勇等<sup>[26]</sup>利用 ROV 水下摄影机观测网片形态变化,结果表明,随着拖速的增加,网片迎流面在水平方向上弯曲成弧形,垂直方向也呈弯曲状;且随着拖速的增加,网片弯曲程度进一步加剧。在本试验空网条件下,当流速较小时( $\leq 0.6$  m/s),直径为 1.11 mm 和 0.96 mm 的空网网囊与直径 0.54 mm 网囊的形态有明显差别,主要是前两者并未成型,即未完全展开;而当流速达到 0.7 m/s,网囊已充分伸展;继续增加流速,3 顶网囊形态趋于一致,差异并不明显,说明高流速时网线直径对空网网囊形态的影响较小,主要是在水流速度较大时,网囊各部位网线所受张力较大,且稳定成型。THIERRY 等<sup>[27]</sup>根据 GLM 分



析,以95%的置信区间估计数据得到了4顶不同拖网(包含网线直径不同的情况)的网口形状,发现4顶拖网的网口形状非常接近,差距小于1.5%,说明高速时网目尺寸的增加和网线直径的减小对拖网几何形状的影响并不显著,佐证了本试验结果。俞鸿源等<sup>[20]</sup>在底拖网模型试验中指出聚乙烯网片材料质地坚硬,当水流速度较小时,拖网模型在水槽试验中成型相对较难。本试验由于设置的流速梯度较大,试验结果仅展示出了成型后不同流速状态下的网囊形态,而网囊成型的动态过程未进行探究,这为后续试验改进提供了思路。

网衣属柔性体,在流速作用下易发生形变。此外,随着渔获物在网囊内不断堆积,也会对网囊形态及拖网整体形状产生影响<sup>[28]</sup>。PETRONE等<sup>[17]</sup>绘制了空网及含模拟渔获物网囊形态侧视图并标识了流速信息,发现渔获物对网囊形态的影响是增加了网囊长度,缩小了网囊中部宽度,与本研究结果吻合。LIU等<sup>[14]</sup>在探究剪裁斜率和渔获物对网囊形态及水动力的影响规律时发现,6顶不同剪裁斜率的空网网囊网衣展开程度与流速呈正比,与剪裁斜率呈反比;相较于空网网囊,含模拟渔获物的网囊振荡明显,推测原因可能在于网目滤水性不同,但其研究并未展示含渔获物的网囊形态。本研究结果显示,含模拟渔获物的网囊尾端因渔获物堆积造成中部宽度明显小于空网网囊,且中部网目趋于闭合,滤水性差,水阻力整体大于空网网囊,这印证了LIU等<sup>[14]</sup>的推断,是对其结果的补充。

在实际应用中,力纲作为拖网网身架构对网囊形状起着至关重要的作用,四片式拖网一般沿缝边装配力纲直至囊网末端。刘莉莉等<sup>[29]</sup>以四片式中层拖网为模型网,通过有限元计算方法和水槽试验,分析了流速在0.4~0.9 m/s时,拖网的形状及各部分受力变化,发现随着流速增加,力纲上张力逐渐增大;当流速达到一定值时,力纲处于完全拉紧状态;当流速持续增大时,力纲张力虽有增加,但对网形的影响程度已经逐渐减弱。可见在高流速条件下力纲张力增加对网具形态的影响变小。本研究结果显示,当流速较大时,网囊形态变化微弱,受制于力纲的约束。因本研究采用四片网片组合成网囊模型,而把每片网片之间的连接绕缝线简化为力纲,未单独再装

配力纲满足与实际情况相同,是造成网具形态由低速向高速过渡时变化明显的主要原因之一。

### 3.3 网囊横向缩结系数

O'NEILL等<sup>[30]</sup>通过SFIA水槽试验认为,估计网囊对渔具选择性的影响是十分困难的,因为不论是增加流速,还是增大网线直径均会造成网囊阻力增大。增加流速会对渔获物的游泳性能产生影响,从而使渔具选择性降低;而增大网线直径利于网目横向展开,可提高渔具选择性。此外,阻力增大会造成网线张力增大,鱼类从张力较大的网目中逃脱可能承受更多伤害,即便逃脱也不易存活。本研究将流速和网线直径作为因子进行分组试验,得到了不同网线直径的网囊分别在不同流速和渔获状态下的横向缩结系数变化情况,可作为O'NEILL等<sup>[30]</sup>的推断的补充说明。

王尔光等<sup>[31]</sup>设计出了水阻力小的流线型实验框架,并开展了大量的平面网片水动力特性的试验,得出与水流平行的平面网片的阻力系数与缩结系数、网线直径和网目尺寸有关。缩结系数决定着网衣的密实程度,影响着网衣的滤水性,对网衣阻力的影响十分重要。GRIMALDO等<sup>[32]</sup>通过对鳕鱼和黑线鳕的研究发现,鱼类在进入网囊后,由于网囊尾部被渔获物堵塞,会使部分游泳能力强的鱼类回游,并试图穿过网囊中段网目逃逸。因此,网囊中部的缩结系数对兼捕鱼类能否成功逃逸十分关键,网囊中段网衣横向缩结系数大,利于水体通过,具有较好的滤水性,更有助于部分鱼类的逃逸。在不同流速条件下,网囊受力后,张力的存在促使网目有并拢的趋势,但网目仍有一定的张开<sup>[33]</sup>。故试验图像结果显示,网囊中段形态较为平缓,并未急剧变化。

当渔获物存在时,网囊结构水平方向上的横向缩结出现了先减小后增大的趋势。主要因为渔获物的存在使网衣在受力后造成网囊中段部位的网目拉紧并拢趋于闭合,横向缩结减小,网衣密实程度增大,网囊中段空间变得狭小,不利于鱼类的通过和逃逸;同时滤水性变差,水阻力增大。在网囊尾端前部横向缩结增大,是由于网囊尾端因渔获物的堆积占据了一部分的空间体积,使得网囊尾端充盈,横向缩结增大并出现最大值。

本研究针对网线直径和模拟渔获物对拖网

网囊水阻力及形态影响进行了水槽试验研究,重点聚焦了不同流速下网囊阻力及形态变化,忽视了渔获物的尺寸对网囊阻力和形态的影响。实际捕捞场景下,随着渔获物的不断累积,会使网囊形态充盈而发生动态运动。根据本研究试验观察发现,网囊中存在渔获物时,网囊末端出现了明显的振荡,易造成网囊水动力及周围流场变化,从而影响渔具稳定性和渔获效率。因此,开展不同模拟渔获物类型和尺寸的网囊水动力及振荡特性研究是今后重点方向之一。

### 参考文献:

- [1] WATSON R, REVENGA C, KURA Y. Fishing gear associated with global marine catches:II. Trends in trawling and dredging [J]. *Fisheries Research*, 2006, 79 (1-2): 103-111.
- [2] ANTICAMARA J A, WATSON R, GELCHU A, et al. Global fishing effort (1950 - 2010): trends, gaps, and implications[J]. *Fisheries Research*, 2011, 107 (1/3): 131-136.
- [3] 孙满昌. 海洋渔业技术学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2012: 187.  
SUN M C. Marine fishery technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2012: 187.
- [4] 黄锡昌. 海洋捕捞手册[M]. 北京: 农业出版社, 1990.  
HUANG X C. Marine fishing manual [M]. Beijing: Agriculture Press, 1990.
- [5] MADSEN N, HANSEN K, MADSEN N A H. Behavior of different trawl codend concepts [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 571-577.
- [6] WILEMAN D A, FERRO R S T, FONTEYNE R, et al. Manual of methods of measuring the selectivity of towed fishing gears[R]. ICES, 1996.
- [7] O'NEILL F G, O'DONOGHUE T. The fluid dynamic loading on catch and the geometry of trawl cod-ends[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1997, 453(1963):1631-1648.
- [8] HERRMANN B, PRIOUR D, KRAG L A. Simulation-based study of the combined effect on cod-end size selection of turning meshes by 90° and reducing the number of meshes in the circumference for round fish [J]. *Fisheries Research*, 2007, 84(2): 222-232.
- [9] MILLAR R B, FRYER R J. Estimating the size-selection curves of towed gears, traps, nets and hooks[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1999, 9(1): 89-116.
- [10] PRIOUR D. Modelling axisymmetric codends made of hexagonal mesh types [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 92: 1-11.
- [11] GRIMALDO E, SISTIAGA M, HERRMANN B, et al. Effect of the lifting panel on selectivity of a compulsory grid section (Sort-V) used by the demersal trawler fleet in the Barents Sea cod fishery [J]. *Fisheries Research*, 2015, 170: 158-165.
- [12] TANG H, XU L X, HU F X. Hydrodynamic characteristics of knotted and knotless purse seine netting panels as determined in a flume tank [J]. *PLoS One*, 2018, 13(2): e0192206.
- [13] 冯春雷, 黄洪亮, 周爱忠, 等. 南极磷虾拖网的性能优化分析[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(4): 662-670.  
FENG C L, HUANG H L, ZHOU A Z, et al. Performance optimization of a trawl for Antarctic krill [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(4): 662-670.
- [14] 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.
- [15] THIERRY N N B, TANG H, XU L X, et al. Hydrodynamic performance of bottom trawls with different materials, mesh sizes, and twine thicknesses [J]. *Fisheries Research*, 2020, 221:105403.
- [16] THIERRY N N B, TANG H, XU L X, et al. Effect of mesh size, twine material and trawl gear accessories on the bottom trawls hydrodynamic performance [J]. *International Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 2019, 4(4): 1-19.
- [17] MEYLER L. Simulation of net structures hydrodynamic fields [M]//PETRONE G, CAMMARATA G. Modelling and Simulation. Intech Open, 2008: 261-282.
- [18] 薄佳男, 林可, 马家志, 等. 高分子编结网片水动力特性水槽试验研究[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(1): 72-79.  
BO J N, LIN K, MA J Z, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of polymer knitted netting [J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(1): 72-79.
- [19] 张敏, 邹晓荣, 季星辉, 等. 东南太平洋公海水域智利竹筴鱼探捕及其商业开发前景探讨[J]. *水产学报*, 2005, 29(3): 386-391.  
ZHANG M, ZOU X R, JI X H, et al. Discussion on exploratory fishing of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the open sea of the southeast Pacific and prospect of its commercial exploitation [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(3): 386-391.
- [20] 俞鸿源. PA单丝网片在底拖网设计中的应用研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.  
YU H Y. Study on the application of PA monofilament netting in the design of bottom trawl [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020.
- [21] 虞聪达, 朱江忠, 何千军. 聚乙烯平面网片水动力特性研究[J]. *浙江水产学院学报*, 1991, 10(1): 40-45.  
YU C D, ZHU J Z, HE Q J. A study on the hydrodynamic properties of PE plane net [J]. *Journal of Zhejiang College of Fisheries*, 1991, 10(1): 40-45.
- [22] TANG H, HU F X, XU L X, et al. Variations in hydrodynamic characteristics of netting panels with various

- twine materials, knot types, and weave patterns at small attack angles[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1923.
- [23] TANG H, HU F X, XU L X, et al. The effect of netting solidity ratio and inclined angle on the hydrodynamic characteristics of knotless polyethylene netting[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(5): 814-822.
- [24] 陈鹿. 网片水动力系数实验研究及数值模拟[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- CHEN L. Experimental study on the hydrodynamic coefficients of plane nettings and numerical simulation[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [25] 唐浩. 金枪鱼围网网具水动力特性及沉降性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- TANG H. Study on hydrodynamic characteristic and sinking performance of tuna purse seine[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [26] 崔勇, 关长涛, 黄滨, 等. 浮绳式围网水动力特性研究[J]. *渔业现代化*, 2018, 45(5): 14-18.
- CUI Y, GUAN C T, HUANG B, et al. Study on hydrodynamic characteristics of float-type net enclosure[J]. *Fishery Modernization*, 2018, 45(5): 14-18.
- [27] THIERRY N N B, TANG H, ACHILE N P, et al. Comparative study on the full-scale prediction performance of four trawl nets used in the coastal bottom trawl fishery by flume tank experimental investigation[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 95: 102022.
- [28] 陈明鑫, 许柳雄, 唐浩, 等. 基于多元变量的南极磷虾拖网作业状态影响因素分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(1): 144-154.
- CHEN M X, XU L X, TANG H, et al. Factors influencing the trawling status of Antarctic krill fishery based on multivariate analysis[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(1): 144-154.
- [29] 刘莉莉, 胡夫祥, 万荣, 等. 捕鱼拖网形状与张力特性的数值模拟与水槽试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(9): 69-75.
- LIU L L, HU F X, WAN R, et al. Numerical simulation and flume experiment of shape and tension force characteristics of fishing trawl[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(9): 69-75.
- [30] O'NEILL F G, KNUDSEN L H, WILEMAN D A, et al. Cod-end drag as a function of catch size and towing speed[J]. *Fisheries Research*, 2005, 72(2/3): 163-171.
- [31] 王尔光. 关于与流平行的平面网片水动力的研究[J]. *大连水产学院学报*, 1987, 8(2): 83-96.
- WANG E G. Study on the hydrodynamic resistance for a flat web stretched in parallel to the flow[J]. *Journal of Dalian Fisheries College*, 1987, 8(2): 83-96.
- [32] GRIMALDO E, SISTIAGA M, LARSEN R B. Evaluation of codends with sorting grids, exit windows, and diamond meshes: size selection and fish behaviour[J]. *Fisheries Research*, 2008, 91(2/3): 271-280.
- [33] 臧迎亮, 虞聪达. 过滤性网渔具网囊网目扩张性能研究[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2012, 31(4): 350-356.
- ZANG Y L, YU C D. Study on the expansion performance of meshes of cod-End of filterable fishing gears[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2012, 31(4): 350-356.

## Effects of twine diameter and catch on drag and configuration of trawl codend

TANG Hao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xinru<sup>1</sup>, ZHU Anran<sup>4</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, SUN Qiuyang<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, ZHU Meixi<sup>1</sup>, XU Liuxiong<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Ocean Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. College of Marine Culture and Law, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of drag and configuration for twine diameter and catch on the trawl codend, different codend models with three twine diameters (1.11 mm, 0.96 mm, 0.54 mm) and two catch status (empty codends and codends with catch) under five current speeds (0.5 m/s, 0.6 m/s, 0.7 m/s, 0.8 m/s, 0.9 m/s) were carried out for model test to compare and analyze the changes of configuration, drag and the horizontal hanging ratio of codends in the flume tank of Shanghai Ocean University. The results show that: (1) For empty codends, the drag coefficient of codend increases with the increase of twine diameter. With the increase of Reynold number, the drag coefficient decreases. (2) There is a positive correlation between codend resistance and flow velocity, twine diameter and catch. (3) The middle width of codend with catch increases with the increase of twine diameter. Compared with empty codends, the length of codends with catch increases obviously with the increase of flow velocity. While the overall configuration of empty codends is full. (4) The horizontal hanging ratio of empty codends decreases first and then tends to be stable, while the horizontal hanging ratio of codends with catch decreases first and then increases to the maximum. The results of this study can provide scientific basis for improving the hydrodynamic performance of mid-water trawl codend and the operation characteristics and selectivity of fishing gear.

**Key words:** codend; twine diameter; catch; drag force; configuration of codend