

基于 PIV 技术的方形网箱二维流场分析*

崔勇 关长涛 赵侠 刘超 黄滨 李娇

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室
中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071)

摘要 方形重力式网箱在水流中会产生一定的阻流效应,研究不同类型网箱在不同流速下网箱周围的减流情况非常重要。本研究通过水槽试验,设计了 4 组不同网目形状与网目尺寸的网箱模型,利用粒子测速技术(PIV)与多普勒流速计(ADV)试验技术,分析方形网箱二维流场特性、流速分布及其减速情况。结果显示,水流经过 4 组网箱后均出现明显的流速衰减,衰减区的高度与网箱高度大致相当;而网箱底部则出现流速增大区。ADV 与 PIV 测量结果基本一致。当来流速度为 0.18 m/s 时,4 组网箱中心点的平均流速衰减系数在 0.5–0.8 左右。装配菱形网目的网箱流速衰减略大于方形网目网箱;小网目网箱的流速衰减则明显大于大网目网箱,而网箱的平均流速衰减系数随流速变化趋势不明显。结果表明,利用 PIV 技术给出经过网箱中心点铅垂面流场分布的云图呈现,可清晰看出网箱周围的水流流线分布疏密程度。

关键词 网箱;阻流效应;粒子测速;水槽试验

中图分类号 S965 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2015)05-0138-07

深水网箱布设的海域通常流速较大,因而,水流因素对网箱设施的稳定与养殖鱼类的安全至关重要。深水网箱内外水体交换好,鱼类能够在接近自然的环境中生长,可有效减少病害的发生,从而提高养殖品质。然而,流速过大将导致网箱有效养殖容积减少(万荣等, 2007; Zhao *et al.*, 2007; 崔勇等, 2010)以及网箱变形严重(Cui *et al.*, 2013),对鱼类的健康养殖带来不良影响。众多研究表明(Lee *et al.*, 2008; 崔勇等, 2011; 黄小华等, 2011),网箱结构所受到水流的作用力与流速的平方成正比,在计算水流对网箱结构作用时,如果忽略流速的变化将会产生较大的误差。此外,网箱周围流场的分布也会影响饵料物质的输送与代谢废物的转运。因此,有必要针对网箱结构的减流情况开展研究。

网箱的网衣部分由网线组成,具有结构直径细小、柔性易变形的特征,而且,网线表面并非光滑,对流态的影响也极为复杂。目前,针对网箱流场特性的研究多采用水槽试验来进行。黄六一等(2007)依据

渔具模型试验方法,设计并制作了浮式箱网模型来进行水槽试验。结果表明,箱网结构通过合理布设能够有效减小流速。李玉成等(2005)设计了 6 种重力式网箱模型,根据试验结果对这些网箱的阻流效应进行研究,分别得出了网箱内部与后部的阻流系数。近些年来,随着计算机软硬件技术的发展,国内外学者先后利用商业软件对网衣及网箱结构的流场变化进行仿真模拟。Patursson 等(2010)将网片结构看成多孔介质,并且假设网片结构固定不动,对网片的流场特性进行数值模拟。Zhao 等(2013)将网箱假定为多个不同角度网片的组合体,同样利用多孔介质模型,通过商业软件 Fluent 对网片及网箱结构周围流场变化进行研究。

为全面获取网箱周围流速变化规律及流场分布,本研究采用粒子图像测速技术(简称 PIV)与三维流速仪(ADV)定点测速相结合,对装配不同种类网衣的方形网箱进行流速测量。试验分别研究了网目形状、网目大小对方形网箱阻流效应的影响,研究结果可为今

* 国家自然科学基金(30972256、51239002)和现代农业产业技术体系建设专项(CARS-50-G05)共同资助。崔勇,
E-mail: cuiyong@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2014-10-21, 收修改稿日期: 2014-12-21

后网箱的水动力学特性研究提供有益的参考。

1 材料与方法

1.1 试验设备

本研究于 2013 年 5 月 4 日在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室波流循环水槽进行。水槽长 22 m、宽 0.45 m、高 0.6 m。试验利用 PIV 设备来获取经过网箱中心点铅垂面的流速分布情况。PIV 是一种瞬态、多点、无接触式的激光流体力学测速方法,能在同一瞬态记录下大量空间点上的速度分布信息,并可提供丰富的流场空间结构以及流动特性(Bi *et al.*, 2013)。PIV 系统主要由高分辨率 CCD 相机、双 ND:YAG 激光器、同步仪、图像采集卡以及计算机组成(图 1)。示踪粒子采用聚氯乙烯(PVC)粉末。利用 TSI 公司的 INSIGHT 3G™ 软件进行粒子图像分析。通过 CCD 照相机每次采集 8 组图像,每一组图像采集的时间间隔平均为 0.038 s,对采集到的图像进行整理分析处理就可得到网箱周围流场分布。此外,通过 ADV 流速仪监测来流速度以及测量不同设定点位的流速,测量精度为 1 mm/s,采样频率为 50 Hz。

1.2 试验网箱

试验以 10 m × 10 m × 10 m 的方形网箱为原型,根据水槽的实际尺寸,尽量减少槽壁的影响。采用重力相似准则,确定模型试验的模型比尺为 1:50,试验水

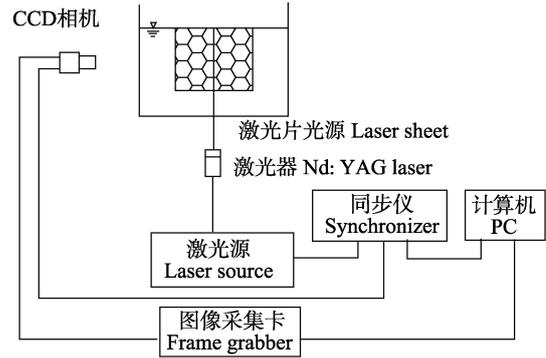


图 1 粒子图像测速(PIV)试验装置
Fig.1 PIV scheme of the experimental setup

深设定为恒定水深 0.4 m。模型网箱分别装配不同形式的网衣,图 2 为 4 种网箱在一定水流条件下的展开图,网衣参数见表 1,框架材料为直径 6 mm 的细钢管。

1.3 试验布置

试验网箱通过垂直杆固定在水槽上方的支架上,模型网箱布置于水槽中心位置,ADV 流速仪测量点的位置如图 3 所示。从图 3 可以看出,坐标原点位于水平面中心线距离网箱中心前 0.2 m 处,X 轴为水流方向,Z 轴为水深方向。模型试验设计 4 组流速 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 ,分别为 0.06、0.10、0.14、0.18 m/s,每组流速分别对 4 组网箱进行测量。每组数据重复 3 次,取平均值,每次测量间隔时间 30 s。位置点 1 测得的流速即为来流速度。

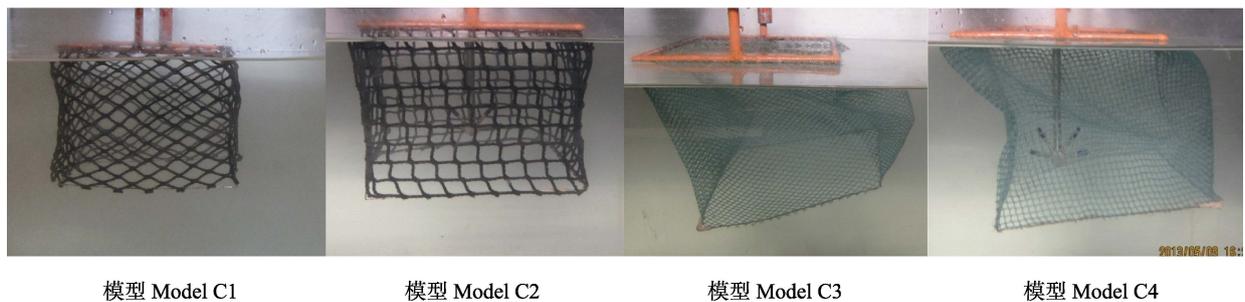


图 2 4 种不同类型网箱模型
Fig.2 Four kinds of cage models

表 1 模型网箱参数
Tab.1 Characteristics of the net models

网箱编号 Net No.	网目形状 Mesh shape	目脚长度 Bar length(mm)	网线直径 Twine diameter(mm)	结节情况 Knot	纵向缩节系数 Hanging ratio	网衣材料 Net material
C1	菱形 Diamond	20	2.5		0.67	PE
C2	方形 Square	20	2.5	无结节		PE
C3	菱形 Diamond	5	1	Kontless	0.6	PA
C4	方形 Square	5	1			PA

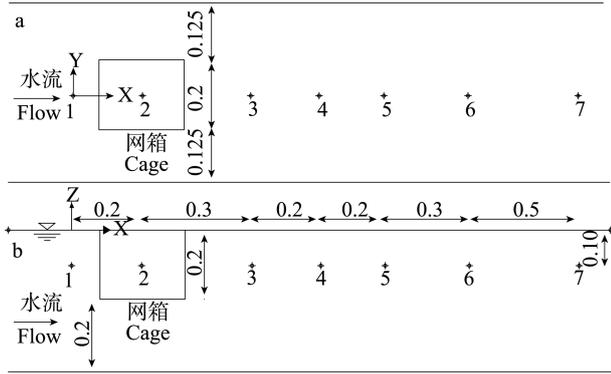


图 3 网箱测量点

Fig.3 Physical model of a cage and general setting of the measurement points (unit: m)

(a)为俯视图; (b)为正视图
(a) horizontal view; (b) vertical view

2 结果与分析

2.1 ADV 测量结果

图 4 为 4 组网箱在设定点的 ADV 测速值。从图 4 中可以看出, 不同位置点的流速变化比较明显, 4

组流速在不同点位的流速变化趋势基本一致。不同来流速度通过网箱时的最低流速均出现在点位 3 与点位 5 之间, 即距离网箱背流面 1-3 倍网箱长度范围内。沿水流方向点位 5 之后的流速逐渐增大, 而点位 7 处的速度仍然小于来流速度, 由此可见网箱的流速衰减范围较大(图 3)。图 5 为 4 组网箱在不同点位流速衰减系数的比较, 流速衰减系数为流速测量值 u 与来流速度 u_0 的比值(比值越小, 流速衰减越大)。由图 5 可知, 在流速衰减最大的区域, C3、C4 两种网箱的流速衰减系数明显小于 C1、C2 两种网箱; 通过比较可以发现, 装配菱形网目的网箱流速衰减系数略小于方形网目网箱。其中, 当来流速度为 u_4 时, 网箱 C1、C2、C3、C4 中心点(点位 2 处)的流速衰减系数分别为 0.73、0.79、0.53、0.64。图 6 为点位 3 与点位 4 处, 4 组网箱流速衰减系数随来流速度变化规律。从图 6 中可以看出, 在点位 3 处, C1 与 C2 两种网箱的流速衰减系数随来流速度变化不明显; 在点位 3 和点位 4 处, C3 的流速衰减系数均随着来流速度的增加而逐渐增大。

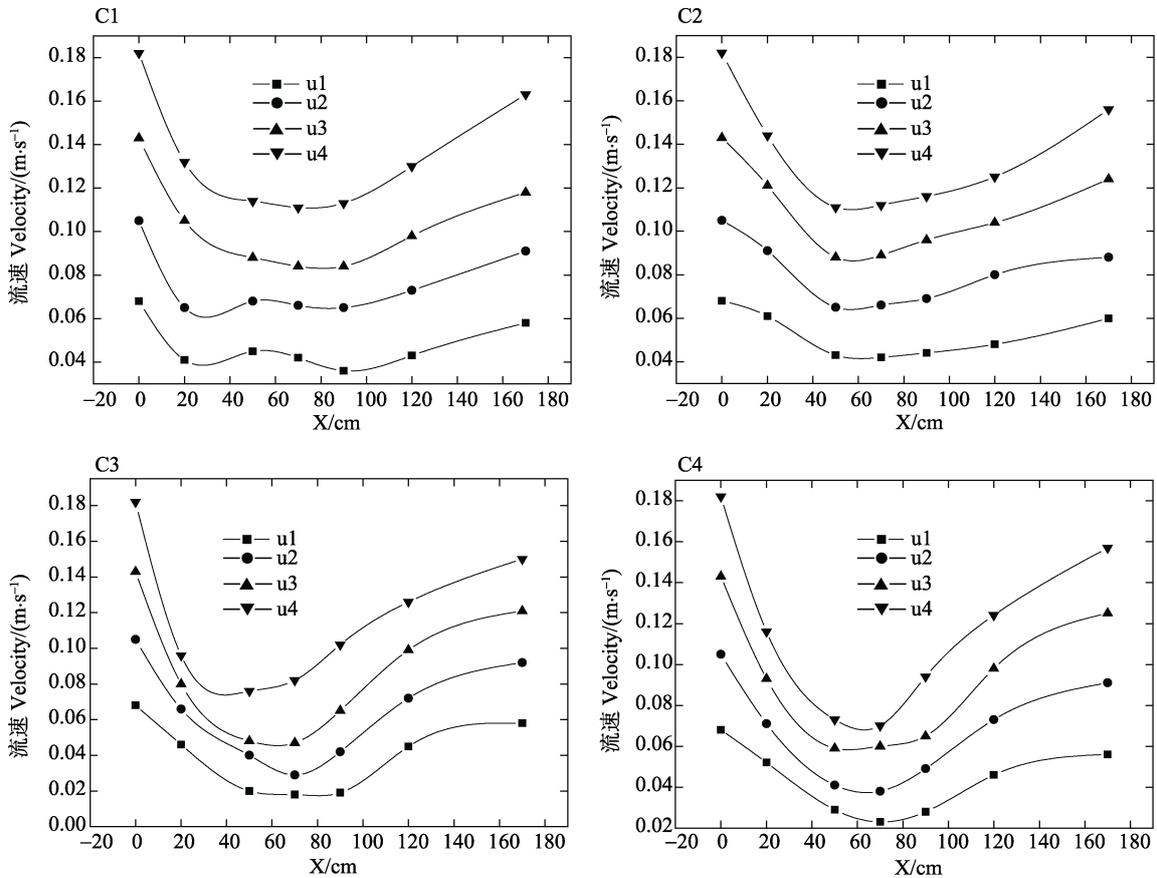


图 4 4 组网箱 ADV 测速结果

Fig.4 ADV measurement results of the four cages

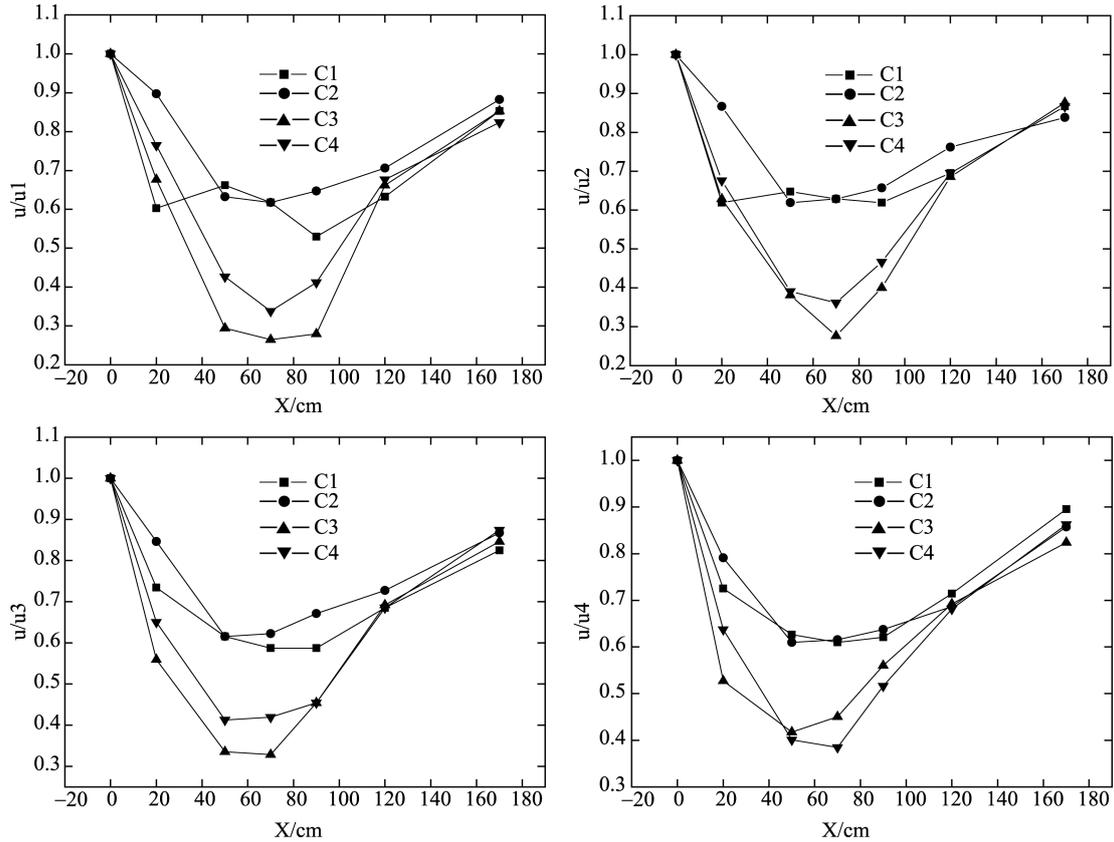


图 5 4 组网箱不同点位流速衰减系数

Fig.5 Flow-velocity reduction factor at different measurement points around four cage models

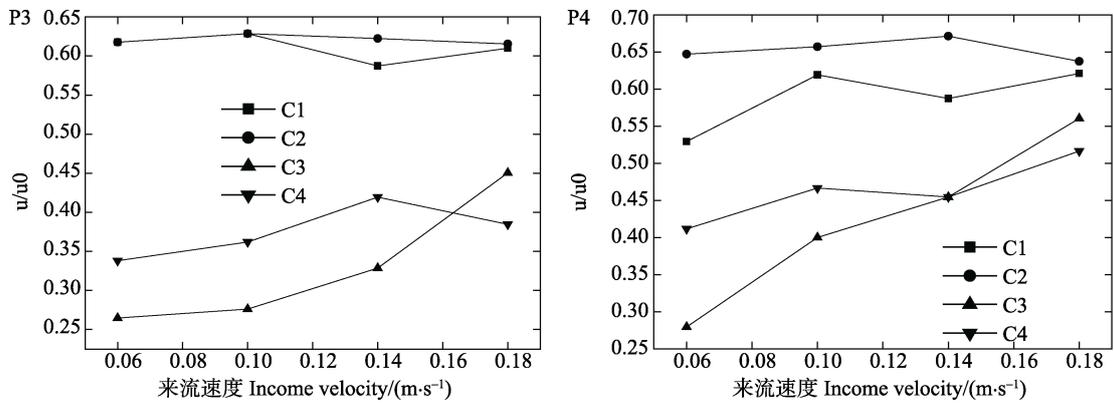


图 6 流速衰减系数随流速变化

Fig.6 Flow-velocity reduction factor for four income velocities

2.2 PIV 研究结果

PIV 研究结果显示, 在不同流速条件下, 网箱周围流场分布情况无明显差异。因此, 选取来流速度 0.18 m/s 为例, 分析网箱周围流场变化情况。图 7 为 PIV 分析结果与 ADV 测量结果比较。图 7 中 PIV 分析结果显示, 流速随 X 轴呈现波动趋势, 这可能与网箱结构变形有关。如图 7 所示, 虽然 PIV 与 ADV

测速不是在同一时间进行, 但最终结果比较基本一致。其中, C3、C4 两组网箱在点位 3 处的比较值差异稍大, 原因可能是这两种网箱的背面网衣在此流速下变形较大, 从而引起水流扰动所致。图 8 水深为 -0.15 m 处, 流速沿 X 轴的变化趋势。从图 8 中可以看出, 水流通过 4 组网箱后均产生一定的流速衰减。其中, C3 和 C4 的衰减程度明显大于 C1 和 C2, 尤其在网箱内部区域, 流速衰减系数为最小。

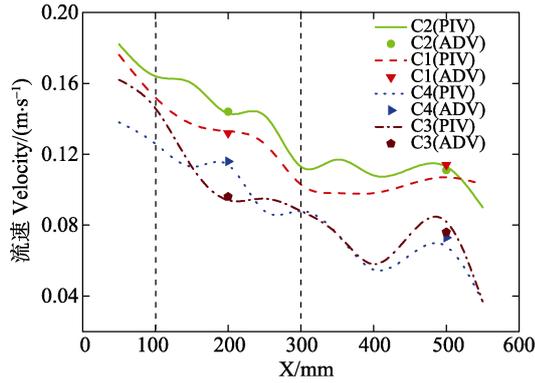


图 7 PIV 分析结果与 ADV 测量结果的比较
Fig.7 Comparison of PIV result and ADV result

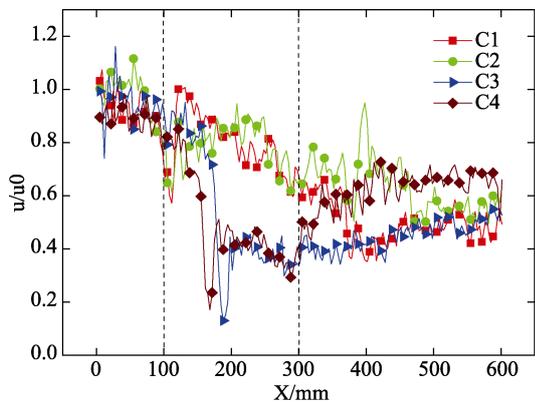


图 8 流速衰减沿 X 轴变化趋势(y = 0, z = -0.15 m)
Fig.8 Velocity along the line in the X direction

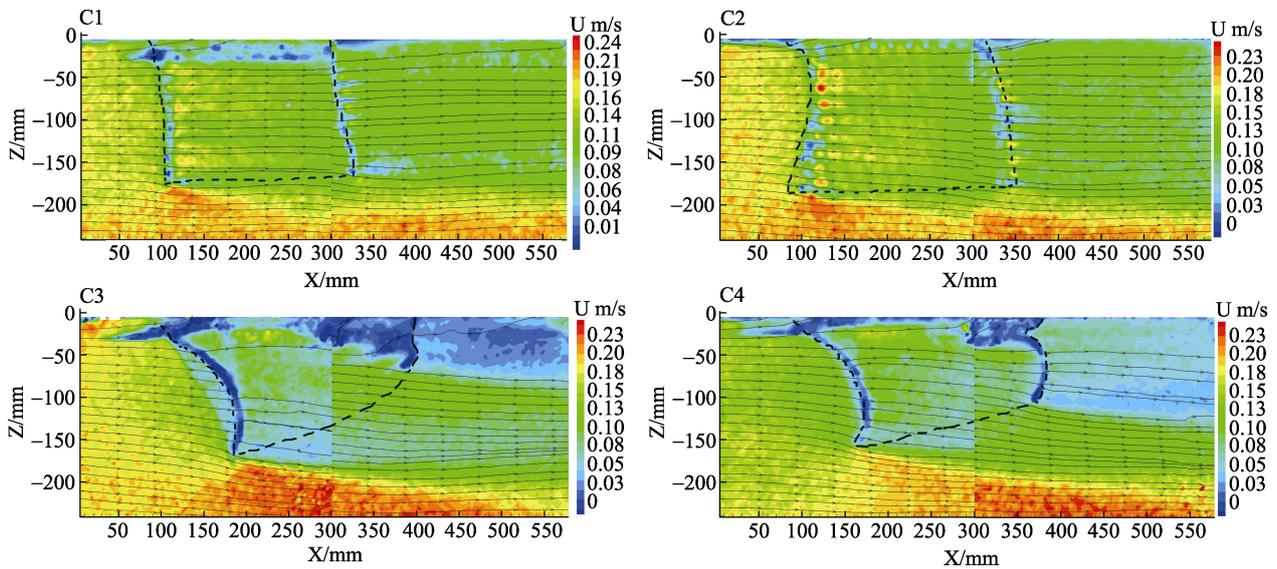


图 9 通过网箱中心点铅垂面的流场分布
Fig.9 Flow-velocity distribution on a vertical cut through the center of the cage

黄六一等(2007)对方形网箱进行水槽减流试验, 结果显示, 网箱后部的减流区域集中在通过网箱中心的铅垂面上, 流速衰减为 20%–45%, 与本研究结果

图 9 为通过 4 种网箱中心点铅垂面的流场分布云图呈现。从图 9 中可以看出, 水流经过 4 组网箱后均出现明显的流速衰减, 衰减区的高度与网箱高度大致相当。此外, 研究发现, 网箱底部出现明显的流速增大区。比较 4 组网箱流速衰减情况, C3 最为显著, 然后依次为 C4、C2、C1。图中流线箭头方向表示水流方向, 4 组网箱周围水流方向趋势基本一致, 究其原因, 可能由网衣部分网线直径较小, 水流较容易通过所致。

3 讨论

目前, 针对网箱阻流效应的研究方法除了物理模型试验外, 还有海上实测与计算机数值模拟。Fredriksson 等(2007)对设置与开放海域的网箱进行实际观测, 发现流速衰减接近 10%。网箱在实际海区中通常受到风、浪、流等多种载荷的共同作用, 因此, 海上实测对试验设备要求较高, 难度也最大。在数值模拟试验方面, Zhao 等(2013)利用多孔介质模型来模拟网箱的网衣结构, 计算结果显示, 圆形网箱中心位置的流速衰减系数为 0.87。然而, 将多孔介质与柔性的网衣相比较, 其水动力特性还是存在一定的差异。由此可见, 水槽模型试验仍然是研究网箱阻流效应的主要手段。

较为接近。李玉成等(2005)对 6 种不同组合形式的重力式网箱进行阻流效应研究, 得出单体网箱网内与网后的流速衰减系数分别为 0.87 和 0.68, 但其结果并

未给出具体的测量位置。Lader 等(2003)通过模型试验对网箱在水流作用下的受力与变形进行研究, 结果发现, 网箱内部的流速衰减平均值为 20%。上述研究均通过 ADV 流速仪进行单点式测量, 由于受到测量断面及测量点数量的限制, 无法对网箱内部及后部的流态分布进行详细分析。本研究通过 PIV 技术, 则可以同时获得网箱区任意剖面流场分布的云图与矢量图。其次, 上述研究通常只采用单种网箱模型, 并未对不同网目大小与网目形状的改变进行横向对比。黄六一等(2007)通过理论分析认为, 网目越小以及横向缩节系数越小, 则减流效果越好。本研究对比了 4 种不同规格网目的网衣, 结果显示, 小网目的网衣阻流效应明显大于网目网衣, 验证了上述观点; 同时, 研究还发现, 装配菱形网目的网衣阻流效应略大于方形网目网衣。究其原因, 可能与不同网衣结构的密实度有关(Bi *et al.*, 2013)。此外, 由于 C1 与 C2 模型采用 PE 材料, C3 与 C4 模型采用 PA 材料, PE 材料柔挺性好, 且网线较粗, 在流速较低时, 会减小模型网衣变化; 而 PA 网线细小、柔软, 模型网衣变化正常, 也会对试验结果产生影响, 其具体影响今后将进行深入研究。通过 PIV 流场云图分析可以看出, 小网目的阻流效应虽然大于大网目网衣, 但装配小网目网衣的网箱在水流冲击下变形也较大, 导致网箱有效养殖容积减小, 同时极易造成网衣破损。此外, 观察流场云图可见, 不同网箱底部均出现流速加速区域, 这对于及时带走养殖鱼类的残饵及排泄物, 加强网箱内外水体交换具有积极作用。本研究结果也可为网箱耐流特性模拟研究中的流速设定, 提供有益的参考(Lee *et al.*, 2008; 崔勇等, 2011; 黄小华等, 2011)。

参 考 文 献

万荣, 崔勇, 崔江浩, 等. 一种基于有限元原理的养殖网箱耐流特性的数值计算方法. 中国海洋大学学报(自然科学

- 版), 2007, 37(5): 709–712
李玉成, 陈昌平, 李春柳, 等. 重力式网箱减流效应的研究. 中国造船, 2005, 46(增刊): 105–109
崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 基于有限元方法对波流场中养殖网箱的系统动力分析. 工程力学, 2010, 27(5): 250–256
崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 基于有限元方法对鲆鲽网箱耐流特性的数值模拟. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(6): 051–054
黄小华, 郭根喜, 胡昱, 等. 波流作用下深水网箱受力及运动变形的数值模拟. 中国水产科学, 2011, 18(2): 443–450
黄六一, 梁振林, 宋伟华, 等. 方形箱网结构减流效果试验. 中国水产科学, 2007, 14(5): 860–863
Bi CW, Zhao YP, Dong GH, *et al.* Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net. *Aquacult Eng*, 2013, 57: 71–81
Cui Y, Guan CT, Wan R, *et al.* Numerical simulation of a flatfish cage system in waves and currents. *Aquacult Eng*, 2013, 56: 26–33
Fredriksson DW, DeCew JC, Tsukrov I, *et al.* Development of large fish farm numerical modeling techniques with in situ mooring tension comparisons. *Aquacult Eng*, 2007, 36(2): 137–148
Lader PF, Enerhaug B, Fredheim A, *et al.* Modeling of 3D net structures exposed to wave and current. In: 3rd International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, 2003, : 19–26
Lee CW, Kim YB, Lee GH, *et al.* Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Eng*, 2008, 35(14–15): 1521–1532
Patursson Ø, Swift MR, Tsukrov I, *et al.* Development of a porous media model with application to flow through and around a plane net. *Ocean Eng*, 2010, 37(2): 314–324
Zhao YP, Li YC, Dong GH, *et al.* Numerical simulation of the effects of structure size ratio and mesh type on three-dimensional deformation of the fishing-net gravity cage in current. *Aquacult Eng*, 2007, 36(3): 285–301
Zhao YP, Bi CW, Dong GH, *et al.* Numerical simulation of the flow field inside and around gravity cages. *Aquacult Eng*, 2013, 52: 1–13

(编辑 陈严)

Analysis of Two-Dimension Flow Field of the Square Cage Based on Particle Image Velocimetry (PIV)

CUI Yong^①, GUAN Changtao, ZHAO Xia, LIU Chao, HUANG Bin, LI Jiao

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract The current in sea can maintain the water quality in the cage, but the strong current can cause serious deformation of the cage and reduce the effective volume of the cage. This study was conducted to research the reduction in flow velocity downstream from square cages in currents. The flow-velocity distribution downstream from cages was investigated with four different net mesh shapes and sizes. The reduction in flow velocity was recorded using both the Particle Image Velocimetry (PIV) and Acoustic Doppler Velocimetry (ADV). The results showed that there was an obvious reduction in flow velocity downstream in the four cage models. The height of the flow-reduction region was approximately the same as the height of the cage. The flow velocity increased at the bottom of the cage. The results achieved by PIV consistent with the data recorded by ADV. The average reduction factor of the four cage models was from 0.5 to 0.8 at 0.18 m/s the incoming velocity. The reduction in flow velocity of the cage with small meshes was greater than the cage with big meshes. The reduction in flow velocity of the cage with diamond meshes was slightly greater than the cage with square meshes. The average reduction factor was not obviously impacted by the incoming velocity. The results of the vertical plane through the center of the cage by PIV were visualized by the velocity nephogram. These findings will contribute to the understanding of the flow characteristics around the square cage.

Key words Fish cage; Flow-velocity reduction; Particle-image velocimetry; Flume experiment

① Corresponding author: CUI Yong, E-mail: cuiyong@ysfri.ac.cn