



# 船行波作用下生态护岸空腔结构动力特性研究\*

田树海<sup>1</sup>, 黄 伟<sup>2,3</sup>, 李寿千<sup>2</sup>, 于海然<sup>4</sup>, 滕 娟<sup>5</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 4. 山东海河港口有限公司, 山东 济南 250002;

5. 扬州市水利工程建设中心, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 针对限制性航道船行波作用下的生态护岸问题, 研发了新型生态护岸空腔结构, 开展自航船舶模型水槽试验, 研究船行波作用下腔体内流速分布、紊动特征及集鱼效应。结果表明, 在船行波作用下, 受腔体复杂结构控制, 水体流动由低频波振荡流转变为高频边界层紊流, 距边壁越远流速越大, 且能量在各频率趋于均匀分布。腔体内紊动呈现多峰值并逐渐耗散的过程, 正常船速 4.60 m/s 时, 最大紊动能为  $0.0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 位于鲫鱼的偏好动能范围之内; 船速增大至 6.3 m/s 时, 最大紊动能为  $0.1771 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 超出鲫鱼的偏好动能范围, 不利于鱼类栖息, 船舶在鱼类重点保护区宜限速航行。

**关键词:** 生态护岸; 空腔结构; 时均流速; 紊动特性; 集鱼效应

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0134-07

## Turbulent characteristics of ecological revetment cavity structure under action of ship traveling wave

TIAN Shu-hai<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>2,3</sup>, LI Shou-qian<sup>2</sup>, YU Hai-ran<sup>4</sup>, TENG Juan<sup>5</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;

2. Nanjing hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

4. Shandong Haihe Port Co., Ltd., Jinan 250002, China;

5. Yangzhou Water Conservancy Engineering Construction Center, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** To solve the problem of ecological revetment under the action of traveling wave in restricted waterway, a new type of ecological revetment cavity structure is developed, and the model flume test of self-sailing ship is carried out to study the velocity distribution, turbulence characteristics and fish gathering effect in the cavity under the action of traveling wave. The results show that when the ship traveling wave is controlled by the complex structure of the cavity, the water flow changes from low frequency oscillation to high frequency boundary layer turbulence, the farther away from the edge wall, the greater the velocity is, and the energy tends to be evenly distributed in each frequency. The turbulence in the cavity shows a process of multiple peaks and gradual dissipating, and the maximum turbulent kinetic energy is  $0.0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$  at the normal ship speed of 4.6 m/s. When the ship speed increases to 6.3 m/s, the maximum turbulent kinetic energy is  $0.1771 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , which exceeds the preferred kinetic energy range of crucian carp and is no longer conducive to fish habitat. Therefore, the speed limit should be set for ships sailing in key fish reserves.

**Keywords:** ecological revetment; cavity structure; time-averaged velocity; turbulent characteristics; fish gathering effect

收稿日期: 2022-06-01

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001003); 江苏省水利科技项目(2021016)

作者简介: 田树海(1983—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

近年来, 中小型河流中高等级航道建设需求迫切, 多为限制性航道, 具有水面狭窄、水深较浅等特点。限制性航道船行波对岸坡作用日益显著, 传统硬质护岸结构形式可保障岸坡的稳定, 但割裂了河道与岸坡之间的生态交换, 如何消减船行波以保护岸坡, 并使其兼具生态效应, 是目前限制性航道建设面临的难题。

为消减内河航道船行波及减小硬质护岸对河流生态的影响, 很多航道护岸尝试采用空腔与植被相组合的结构, 史云霞等<sup>[1]</sup>采用芦苇生态护岸, 并在较大高差边坡使用空心砖进行护面; 王炜正<sup>[2]</sup>在连云港航道采用分层式生态防护形式; 黄本胜等<sup>[3]</sup>、李佳皓等<sup>[4]</sup>、何飞等<sup>[5]</sup>研究了植被护岸对船行波的消减效果; 韦余广<sup>[6]</sup>研究了生态护岸抗冲效果; 廖鹏等<sup>[7]</sup>对箱体和插板组合类型生态护岸的消浪效果进行研究。由此可见, 以往研究多集中于生态结构形式及其消浪效果的研究, 而对生态结构体自身的水动力及紊动特征研究较少, 对其带来的生态效应缺乏评估依据。

鱼类习性对船行波产生的紊动较敏感, Groves<sup>[8]</sup>研究发现船舶螺旋桨、水力发电水轮机等产生的紊动会导致鱼类眼睛和表面黏层受到破坏, 容易引起病原体感染, 直接或间接造成鱼类死亡; Lacey 等<sup>[9]</sup>系统梳理了表征影响鱼类游泳行为和栖息地选择的水流紊动参数, 认为紊动强度可以用于评价集鱼效果。黄廷杰<sup>[10]</sup>根据近似各向同性紊流的响应试验建立鲫鱼对紊动能的响应关系, 确定了鲫鱼的感应紊动能和偏好紊动能范围。

由于河海联动运输的优势, 小清河通航后具有一定的船舶交通流, 船行波传递过程以及与岸坡结构相互作用下形成的紊动对鱼类栖息带来影响。本文以小清河限制性航道扩能升级工程为例, 自主研发新型空腔植被护坡形式, 开展大比尺自航船模物理模型试验, 研究腔体内紊动能分布规律, 并从紊动的角度评估其集鱼效应。高振全<sup>[11]</sup>对小清河多个断面进行鱼类采样发现鲫鱼最为常见, 因此本文采用鲫鱼作为研究种群。

1 腔体-植被相结合的生态护岸结构

小清河位于山东省境内, 发源于济南市并由莱州湾入海, 全长 233 km, 承载防洪、排涝、灌溉、航运等多重功能。小清河历史通航等级为Ⅵ级航道, 现已断航, 由于其具有河海联运的特点和优势, 正在实施Ⅲ级航道等级提升及复航工程。航道底宽 45 m, 边坡为1:3, 最低、最高通航水位时水深分别为 3.6、8.0 m, 常水位水深为 5.8 m, 常水位处设有戗台, 宽度为 2 m。小清河航道等级提升后, 属于典型的限制性航道, 代表船型为 500 吨级散货船, 断面有限且船舶大型化, 船行波作用显著, 岸坡全部采用模袋混凝土进行守护防止冲刷。

混凝土模袋全范围护坡虽然能够保证岸坡的稳定性, 但割裂了水体和河岸之间的生态交换。本文提出一种空腔体与植被相结合的护坡形式, 其断面见图 1。空腔体大小为 2 m×2 m×2 m, 顶部与常水位齐平, 邻水面设计为 3 道 0.3 m 宽竖缝的插板, 可最大限度保证消浪效果, 同时为鱼类提供躲避及栖息空间, 腔体及插板平面见图 2; 空腔体后方为 6 m 宽戗台, 戗台处种植芦苇, 戗台后方斜坡种植植被, 芦苇可对船行波进行二次消能, 从而保证后方边坡及植被的稳定。

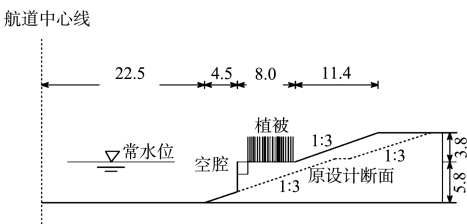


图 1 腔体-植被生态护坡结构断面 (单位: m)

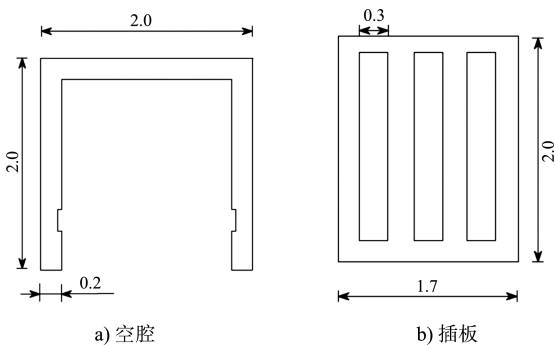


图 2 空腔及插板平面 (单位: m)

2 生态护岸结构水动力试验

2.1 试验设计

试验在南京水利科学院宽水槽中进行,水槽尺寸为45.0 m×6.0 m×0.6 m(长×宽×高),综合考虑船舶模型制作、腔体内水动力便于测量、现有水槽尺寸等,确定试验水槽几何比尺为1:20,相应速度、时间、糙率比尺见表1。试验水槽见图3,试验段布设在水槽中间,长度为25 m,两端各留有10 m供船舶加速和减速,水槽末端设有斜坡块石进行消浪。腔体采用灰塑料板制作;按照相似比尺,试验中腔体尺寸为10 cm×10 cm×10 cm。根据芦苇生长特性,原型中芦苇高度约为

2 m,杆径约为2 cm,棵间距为10 cm;芦苇采用柔性相似塑料杆模拟,按照相似比尺,试验中芦苇高度约为10 cm,杆径约为1 mm,棵间距为5 mm。500吨级船舶原型尺寸为46.0 m×8.8 m×3.0 m(长×宽×高),航速为3.8~11.2 m/s;按照相似比尺,船模尺寸为2.30 m×0.44 m×0.15 m(长×宽×高),船模速度为0.85~2.50 m/s。船舶模型具有自航动力,可遥控自航。

表 1 模型比尺

水平比尺 $\lambda_L$	垂直比尺 $\lambda_H$	流速比尺 $\sqrt{\lambda_L}$	时间比尺 $\lambda_L \lambda_H^{3/2}$	糙率比尺 $\lambda_H^{2/3} \lambda_L^{1/2}$
20	20	4.47	4.47	1.65

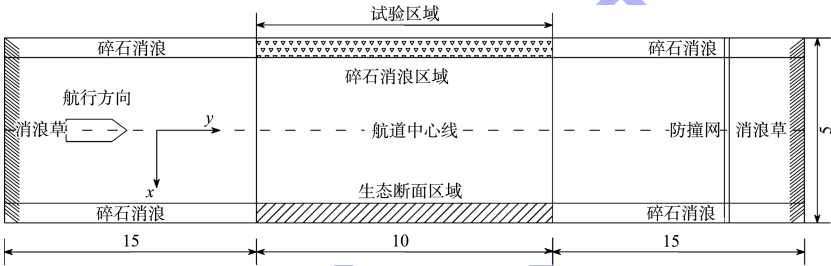


图 3 水槽试验布置 (单位: m)

2.2 试验工况

腔体设置于常水位处,在常水位条件下消浪效果及动力特征显著,因此重点开展常水位试验,水深为5.80 m;设置2种船速,分别为4.6(正常航速)、6.3 m/s;船舶航线选择航道中心线。

2.3 试验测量

为研究生态断面空腔体内的紊流特性,在腔体内中心线上垂向设置3个测点A、B、C,测点离空腔顶部的距离分别为0.9、1.3、1.7 m。为了

对比腔体内外流速及紊动变化规律,在腔体外设置测点A<sub>0</sub>观测流速及紊动过程,该测点距离航道中心线20 m,与测点A水深相同。采用多普勒三维流速仪ADV对水流流动过程进行测量,采样频率25 Hz,采样总量2 250个。同时,在测点A<sub>0</sub>处采用DJ800多点波高仪测量系统对其进行采集,频率22 Hz,采样总量1 980个。流速及波高的测量同步进行,涵盖单艘次船舶作用下船行波产生、传播、消散的整个过程,具体测点布置见图4。

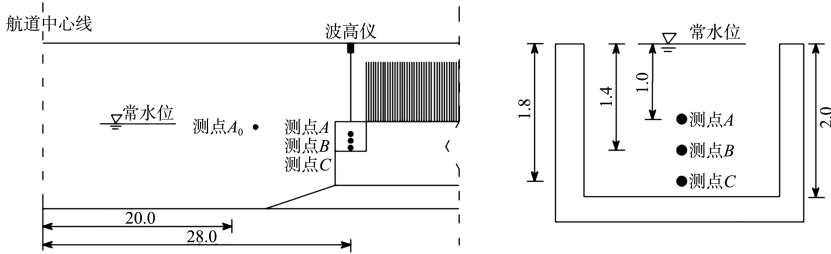


图 4 流速及波高测点布置 (单位: m)

3 试验结果

3.1 船行波特征

船舶在常水深时波高特征见图5,正常航行船

速4.6 m/s条件下,波形主要受船首波的影响,波高整体先增大后逐渐减小,船行波平均周期为3.36 s,由傅里叶频谱可见,波能主要集中于0~

0.50 Hz; 但当船速增大至 6.3 m/s 时, 船首波和船尾波互相干扰, 波高整体呈现逐渐衰减的规律, 船行波平均周期为 4.69 s, 波能主要集中于 0~0.34 Hz。

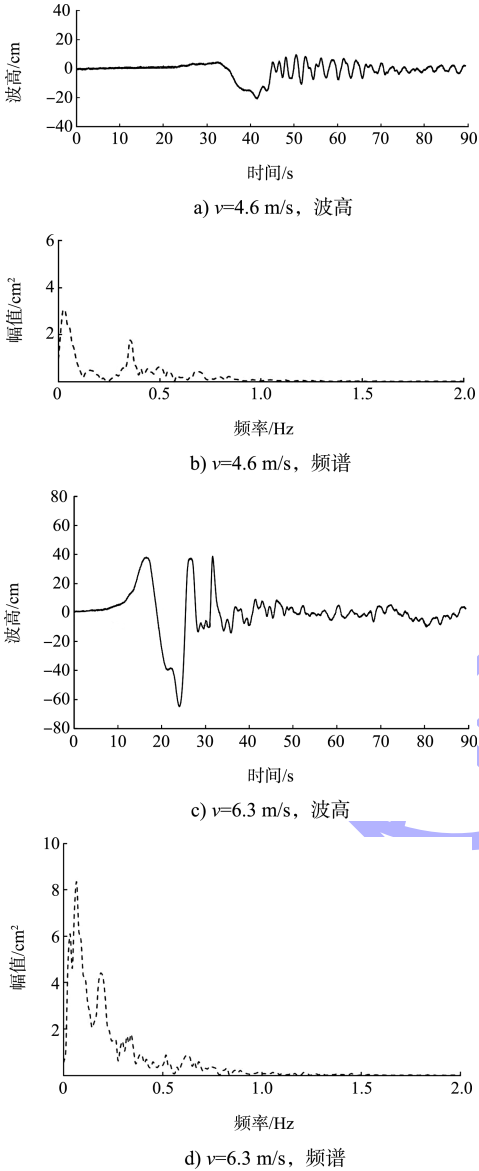


图 5 船行波波高及傅里叶频谱

3.2 流速分布

3.2.1 腔体内外流速对比

腔体外测点  $A_0$  及腔体内测点  $A$  的流速过程对比见图 6。在正常航行船速 4.6 m/s 条件下, 由于船行波与航道中心线有一定的夹角,  $A_0$  测点  $x$ 、 $y$  方向的流速大于  $z$  方向; 船行波进入腔体后, 受到腔体竖缝及腔体边壁的控制, 方向发生改变, 发展成为边界层紊流流动, 腔体内测点  $A$  的  $x$ 、 $y$

方向流速小于  $z$  方向流速, 且呈现周期性震荡。船速增大至 6.3 m/s 条件下, 船行波与航道中心线夹角增大, 使得  $y$  与  $x$  方向流速相近, 波高的显著增加使得整体流速增大; 船行波进入腔体后, 仍然符合上述边界层紊流特征, 整体流速亦显著增大。

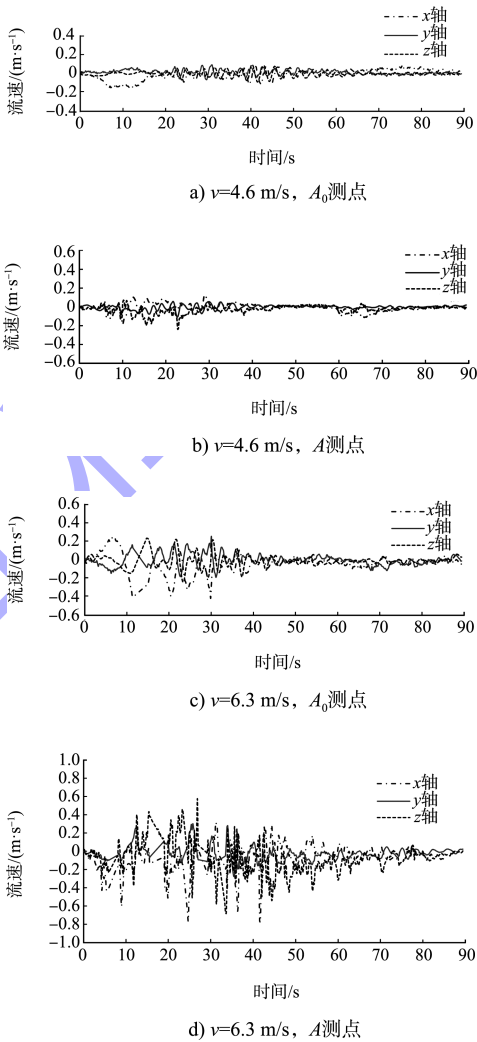


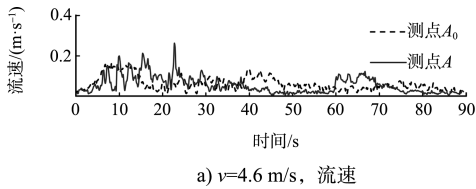
图 6 腔体内外各向流速对比

对流速过程进行傅里叶变换得出其频域, 并对频率的分布能量进行累计, 获得累计频率动能分布特征并定量分析其规律, 见图 7。在正常航行船速 4.60 m/s 条件下, 腔体内外流速频率为 0~3.00 Hz, 腔体外及腔体内的高能量频率主要分布于 0~0.095 Hz 和 0~0.22 Hz, 能量由低频向高频进行转化, 腔体内  $A$  点累计能量高于腔体外  $A_0$  点 35.2%。当船速增大至 6.3 m/s 时, 腔体外及腔体内的高能量频率主要分布于 0~0.42 Hz 和 0~0.54 Hz, 能量由低频向高频进行转化, 腔体内  $A$  点累计能

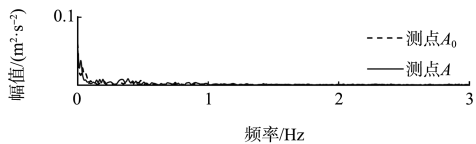
量高于腔体外  $A_0$  点 150%。因此, 船行波由腔体外传递至腔体内的过程中, 受边界限制作用, 能量高频向低频转化, 单点累计能量有所增加。

3.2.2 腔体内流速垂向分布

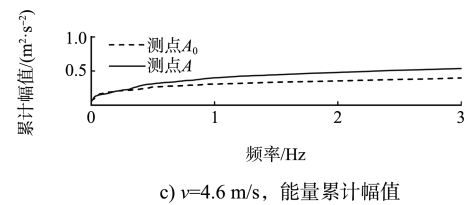
腔体内各测点流速过程及累积频率能量见图 8。正常航行船速 4.6 m/s 条件下, 空腔内 3 个测点的最大流速分别为 0.26、0.15、0.12 m/s, 高能量区域分别集中在 0~0.095 Hz; 测点 A 流速最大, 同一频率下能量最大, 能量均匀分布于各频率; 测点 A 的累计频率能量高于测点 B 约 20%。当船速增大至 6.3 m/s 时, 空腔内 3 个测点最大流速分别为 0.80、1.12、0.18 m/s, 高能量区域集中在 0~0.62 Hz; 测点 A、B 流速明显增大, 且累计能量趋于一致, 远高于测点 C。因此, 航速较小时, 腔体内动能集中于中心点; 随着航速的增加, 腔体内动力特征在垂向趋于一致。



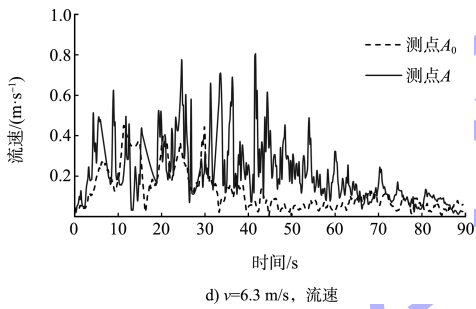
a)  $v=4.6$  m/s, 流速



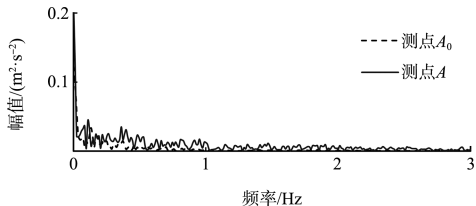
b)  $v=4.6$  m/s, 能量幅值



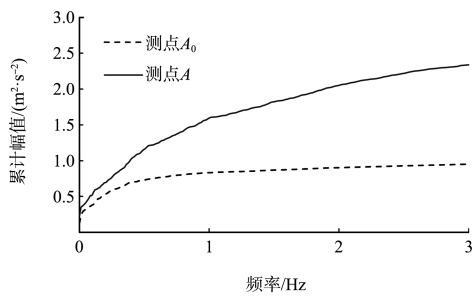
c)  $v=4.6$  m/s, 能量累计幅值



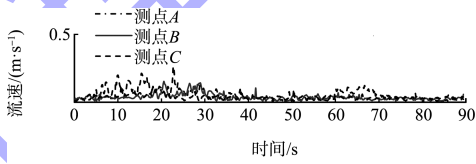
d)  $v=6.3$  m/s, 流速



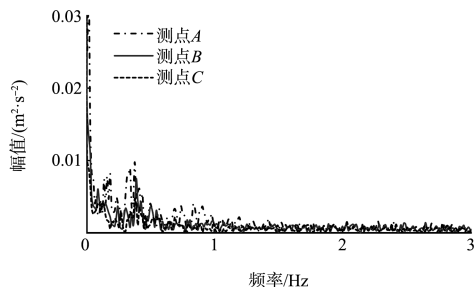
e)  $v=6.3$  m/s, 能量幅值



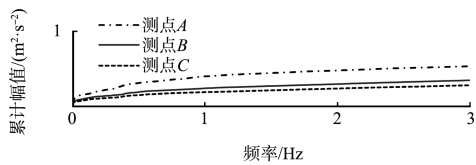
f)  $v=6.3$  m/s, 能量累计幅值



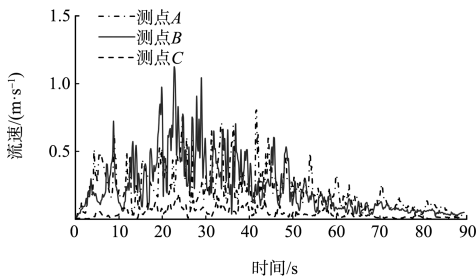
a)  $v=4.6$  m/s, 流速



b)  $v=4.6$  m/s, 能量幅值



c)  $v=4.6$  m/s, 能量累计幅值



d)  $v=6.3$  m/s, 流速

图 7 不同流速条件下腔体内外流速、频谱对比



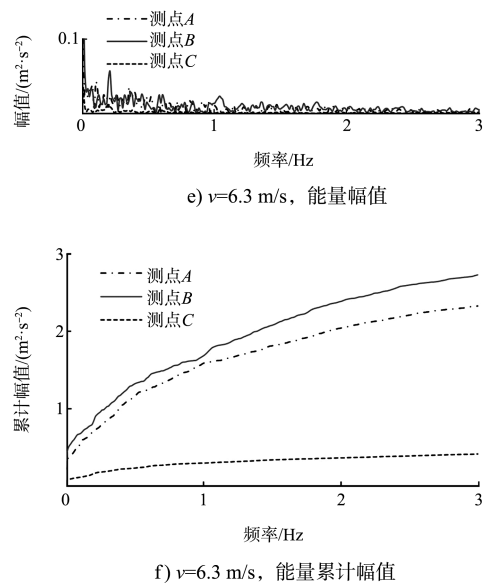


图 8 不同流速条件下腔体内各测点流速和频谱变化

3.3 紊动能

采用时均紊动能 (turbulent kinetic energy, TKE) 统计分析腔体内紊动特性, 其表达式为:

$$\text{TKE} = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u' = u_x - \frac{1}{3} \sum_{t=\frac{1}{f_z}}^{t+\frac{1}{f_z}} u_x \\ v' = v_x - \frac{1}{3} \sum_{t=\frac{1}{f_z}}^{t+\frac{1}{f_z}} v_x \\ w' = w_x - \frac{1}{3} \sum_{t=\frac{1}{f_z}}^{t+\frac{1}{f_z}} w_x \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $t$  为船行波传递至该点后紊动时间历时,  $t \geq \frac{1}{f_z} t$ ;  $f_z$  为采样频率;  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向脉动流速;  $u_x$ 、 $v_y$ 、 $w_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向瞬时流速。

腔体内紊动能变化见图 9, 由于船行波进入腔体后, 腔体内紊动相比于腔体外表现为瞬间增大并出现峰值, 峰值出现于最大振荡流速相位附近, 随后腔体内紊动来回振荡而逐渐耗散。正常航行船速 4.6 m/s 时, 3 个测点最大紊动能分别为 0.002 5、0.001 9、0.001 3  $\text{m}^2/\text{s}^2$ , 测点 A 紊动能

最大, 与流速垂向分布规律一致。当船速增大至 6.3 m/s 时, 3 个测点瞬时紊动能分别为 0.057 9、0.177 1、0.003 0  $\text{m}^2/\text{s}^2$ , 测点 B 紊动能最大, 与流速垂向分布规律一致。各测点处最大紊动能及平均紊动能见表 2。

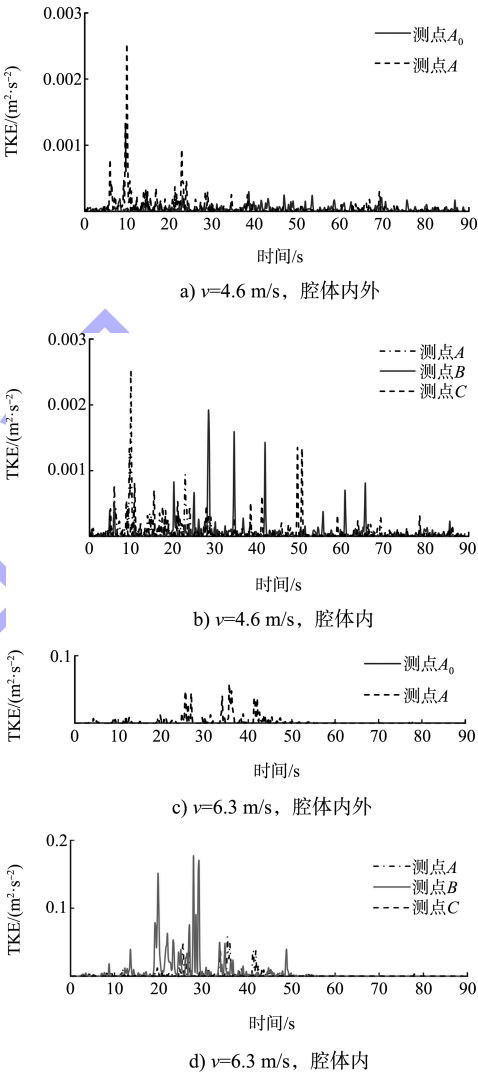


图 9 不同船速条件下各测点紊动能变化

表 2 不同船速条件下腔体内各测点最大紊动能

船速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	TKE <sub>max</sub> /( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )		
	A	B	C
4.61	0.002 5	0.001 9	0.001 3
6.31	0.057 9	0.177 1	0.003 0

3.4 集鱼效果

空腔体通过改变水流结构, 营造了紊动环境, 进而影响河道局部生境条件。黄廷杰开展了不同紊动强度下集鱼效应探究, 建立了鲫鱼对紊动能响应的定量关系, 确定了鲫鱼的感应紊动能为

$(0.9 \sim 1.1) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，鲫鱼的偏好紊动能为  $(1.0 \sim 25.0) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，据此从紊动动能的角度分析船行波作用下空腔体的集鱼效应。

如表 2 所示，正常航行船速下，腔体内不同测点瞬时最大紊动能为  $0.001 \ 3 \sim 0.002 \ 5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，船行波在空腔体内所产生的动能位于鲫鱼的偏好动能范围。船速增大至  $6.3 \text{ m/s}$  时，腔体内 3 个测点瞬时最大紊动能为  $0.003 \ 0 \sim 0.177 \ 1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，超出鲫鱼偏好动能范围。由此可见，腔体空间在正常航行船速下可作为鱼类良好生存栖息地，船速继续增大时不利于鱼类栖息，因此限制性航道对于鱼类重点保护区内船舶需要限速航行。

4 结 论

1) 提出一种将腔体与植被相结合的生态护坡形式，腔体尺寸为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，邻水面采用竖缝透空形式，顶部与常水位齐平，空腔体后方为  $6 \text{ m}$  宽戗台种植芦苇，戗台后方斜坡采用植被护岸。

2) 船行波由腔体外传递至腔体内的过程中，受到腔体竖缝及边壁的控制，水体流动由振荡流发展为边界层紊流，能量由低频向高频转化。腔体内部离腔体壁面越远，流速越大，且能量各频率趋于均匀分布。

3) 腔体内紊动呈现多峰值并逐渐耗散的过程，正常航行船速  $4.60 \text{ m/s}$  时，最大紊动能为  $0.002 \ 5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，位于鲫鱼的偏好动能范围之内；当船速增大至  $6.3 \text{ m/s}$  时，最大紊动能为  $0.177 \ 1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，超出鲫鱼的偏好动能范围，不利于鱼类栖息，船舶在鱼类重点保护区宜限速航行。

参考文献：

[1] 史云霞,陈一梅. 国内外内河航道护岸型式及发展趋势[J].水道港口,2007(4): 261-264.

[2] 王炜正.新型生态护岸在连云港港疏港航道中的应用[J].水运工程,2008(9): 135-139.

[3] 黄本胜,赖冠文,邱静,等.河滩种树对行洪影响试验研究[J].水动力学研究与进展(A辑),1999(4): 468-474.

[4] 李佳皓,拾兵,郭云辉.植物护岸对船行波消减效能的试验研究[J].海洋湖沼通报,2020(1): 50-55.

[5] 何飞,陈杰,蒋昌波,等.考虑根茎叶影响的刚性植物消浪特性实验研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2017,32(6): 770-778.

[6] 韦余广. 基于船行波冲刷影响的改进型生态护岸研究[J].浙江水利水电学院学报,2020,32(4): 30-33.

[7] 廖鹏,丁天平,郑龙,等.箱体与插板组合型生态护岸消浪试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(5): 815-820.

[8] GROVES A B. Effects of hydraulic shearing actions on juvenile salmon: summary report [EB/OL].(2022-02-18) [http://scholar-orks.umass.edn/fishpassage\\_unpul](http://scholar-orks.umass.edn/fishpassage_unpul) lished\_works/102.1972.

[9] LACEY R W J, NEARY V S, LIAO J C, et al. The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers [J]. River research and applications, 2012, 28(4): 429-443.

[10] 黄廷杰.新型丁坝水动力特性及其生态效应试验研究[D].南京:南京水利科学研究院,2019.

[11] 高振全. 水污染对鱼类共栖微生物群落结构的影响[D].济南:山东大学,2019.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 128 页)

[10] 李天碧. 赣江数字航道构建研究[D].南京: 河海大学,2004.

[11] 童剑.京杭运河智慧航运建设方案研究[J].现代交通技术,2021,18(3): 83-87.

[12] “黑龙江省智慧航道建设发展研究”项目启动前期调研[J].中国水运(航道科技),2021(5): 55.

[13] 耿雄飞,洛佳男,王永才,等.智能航行船舶的治理[J].船舶工程,2021,43(8): 26-30.

[14] 洛佳男,张宝晨,耿雄飞,等.船舶智能航行安全风险

及其演化研究[J].中国航海,2021,44(4): 130-135.

[15] 张宝晨,于巧婵,徐加庆,等.浅析船舶智能航行驾驶模式与对外信息交互协同[J].中国航海,2021,44(4): 125-129.

[16] 洛佳男,万晓霞,孙东礼,等.海洋测绘地理空间数据模型(S-100)综述[J].测绘通报,2019(3): 91-97,112.

[17] 石昕.中国内河电子航道图发展研究[J].海洋测绘,2017,37(5): 60-63.

(本文编辑 王传瑜)