

· 综合 ·



基于 Flow-3D 的新型半圆形构件 水动力特性研究

侯仲荃，李锐，李晓舟，孟凡伟

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司，上海 200120)

摘要：生态丁坝是基于水工学和生态学的新型整治建筑物，不仅起到调控河道水位、维护边坡稳定的作用，还促进了生态修复。采用 Flow-3D 流体力学软件分析了新型半圆形构件的流速、紊动能等关键水动力要素。结果表明，基于 Flow-3D 数值模拟得到的水流流速拟合结果良好，采用该软件研究航道整治工程中复杂构件的水动力特性是可行的；新型半圆形构件内的横隔板将腔体分为上下两块区域，上方水流流速、紊动能明显大于下层，且下层流速、紊动能基本不受外界流速影响；构件上下层具有不同的生态效应，其水动力特性分别适宜于鱼类和底栖生物的生存。

关键词：新型半圆形构件；Flow-3D；水动力特性；生态效应

中图分类号：U 617；TV 32

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)04-0020-06

Hydrodynamic characteristics of new semi-circular member based on Flow-3D

HOU Zhongquan, LI Rui, LI Xiaozhou, MENG Fanwei

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Ecological spur dike is a new type of regulation member based on hydraulics and ecology. It not only controls river water level and maintains slope stability, but also promotes ecological restoration. In this paper, Flow-3D fluid mechanics software is used to analyze the flow velocity, turbulent kinetic energy and other key hydrodynamic factors of the new semi-circular member. The results show that the fitting result of flow velocity based on Flow-3D numerical simulation is good, and it is feasible to use this software to study the hydrodynamic characteristics of complex components in waterway regulation engineering. The diaphragm in the new semi-circular member divides the cavity into two areas, the flow velocity and turbulent energy in the upper layer are obviously higher than those in the lower layer, and the flow velocity and turbulent kinetic energy in the lower layer are basically not affected by the external flow velocity. The upper and lower layers of the member have different ecological effects and their hydrodynamic characteristics are suitable for the survival of fish and benthic organisms respectively.

Keywords: new semi-circular member; Flow-3D; hydrodynamic characteristics; ecological effects

丁坝是航道工程中最为常见的整治建筑物，在维护人民财产安全和保障城市经济建设方面做出了重要贡献。然而，传统丁坝虽然在调控河道水位、维护边坡稳定等方面起到巨大作用，但也对局部生境造成侵占，严重影响了水生生物、底

栖生物的繁衍^[1]。随着生态理念的日益发展，生态丁坝的研究对航道工程的发展具有重要意义。透水丁坝的减速、促淤特征成为生态丁坝建设中最为广泛采用的形式，多种多样的透水构件也应运而生，并取得了良好的生态修复效果^[2]。长江

收稿日期：2022-07-06

作者简介：侯仲荃（1996—），男，硕士，助理工程师，研究方向为河口海岸水沙动力及工程应用。

南京以下 12.5 m 深水航道一、二期工程中采用开孔半圆形构件、开孔梯形构件等生态型坝体结构, 不仅取得良好的航道整治效果, 还取得了显著的生态效益^[3]; 南汇东滩促淤二期工程中采用大体积新型六面透水结构构筑潜堤, 对周围流场、冲淤起到了良好的调节作用^[4]。

随着计算流体力学技术的飞速发展, 通过 Flow-3D、Fluent、CFX 等建立模拟数值水槽成为工程可行性研究的重要方式之一。诸多学者也通过计算流体力学软件研究复杂构件的水动力特性, 蔡喆伟等^[5]通过 Fluent 建立三维模型, 研究了不同流速、水深与坝长条件下新型结构齿形丁坝的水流力特性; 刘滨等^[6]以浮管结构的浮式防波堤为研究对象, 通过 Flow-3D 研究结构间隔、孔隙率、入水深度比、出水高度 4 个关键指标对消浪效果的影响, 得出各项指标合适的取值范围。

本文针对长南京以下 12.5 m 深水航道的后续完善工程中提出的设横隔板的新型半圆形构件, 采用 Flow-3D 流体力学软件分析新型半圆形构件内外侧的流场分布、紊动能等关键水动力指标, 探究新型半圆形构件对局地的生态修复效果, 为新型半圆形构件的工程应用提供理论依据。

1 研究方法

1.1 Flow-3D 数值模拟

新型半圆形构件的结构复杂, 其内部的水流结构难以量测, 因此针对该构件水流结构的研究需要借助数值模型。Flow-3D 是由美国流体科学公司 Flow Science Inc. 开发的商业流体软件, 以 Naiver-Stokes 方程为基本控制方程。由于该构件与水流相互作用属于小尺度紊动, 故适宜采用重整化群(renormalization group, RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型描述构件与水流之间的相互作用, 研究构件内外侧的水动力特征。

Flow-3D 数值模型的控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (2)$$

$k-\varepsilon$ 湍流方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} + 2\nu_t S_{ij} S_{ij} - \varepsilon \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - R + 2c_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S_{ij} S_{ij} - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: u_i 、 u_j 为流体的速度; p 为时均压强; k 为湍能量; x_i 、 x_j ($i, j = 1, 2, 3$) 为坐标轴分量; ε 为湍能量耗散率; ρ 为水体密度; ν 为分子黏性系数; ν_t 为涡黏系数, $\nu_t = C_\mu \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right)$; $\bar{u}_i \bar{u}_j = \frac{2}{3k\delta_{ij}} - \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right)$, δ_{ij} 为 kronecker 函数; C_μ 、 c_1 、 c_2 、 α_k 、 α_ε 均为经验系数, $C_\mu = 0.0845$, $c_1 = 1.42$, $c_2 = 1.68$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; $S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i}$; $R = 2\nu S_{ij} \cdot$

$$\frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_j} \cdot \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_i} = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{\varepsilon^3}{k}, \quad u'_i \text{ 为脉冲速度};$$

η 为湍流时间尺度与平均流时间尺度之比, $\eta = Sk/\varepsilon$, S 为应变率张量范数, $S = (2S_{ij} S_{ij})^{1/2}$; η_0 为 η 在均匀剪切流中典型值, $\eta_0 = 4.38$; β 为经验系数, $\beta = 0.012$ 。

1.2 模型验证

为了验证 Flow-3D 模拟的准确性, 采用侯仲荃等^[7]在空心块体丁坝 Flow-3D 的水动力模拟结果与室内水槽试验测量得到的堤前、堤后垂线方向水流流速对比。该模型整体轮廓为 20 cm × 20 cm × 20 cm 正方体, 四面开 10 cm 方孔, 上下开 14 cm 方孔, 中间区域自上而下透空形成大体积空腔, 见图 1。

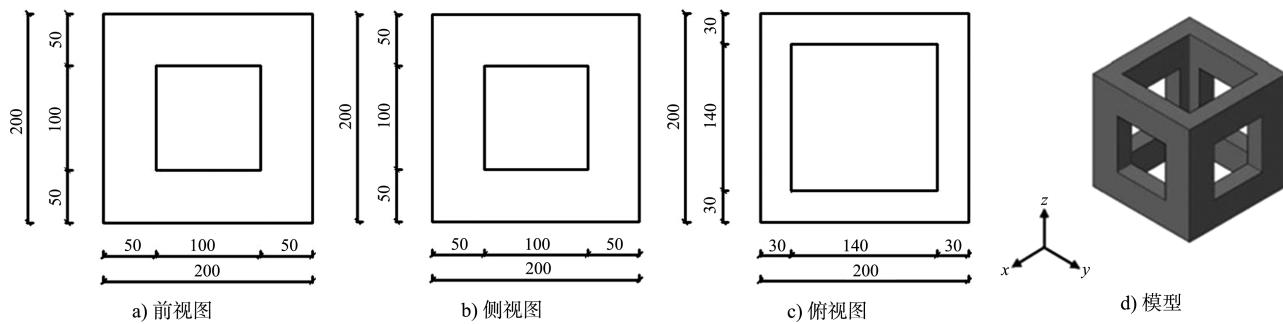


图 1 空心块体 (单位: mm)

如图 2 所示, 数值模拟计算结果与水槽试验实测结果拟合良好, 表明 Flow-3D 采用的湍流模型可以较好地模拟复杂透水构件的流场变化。

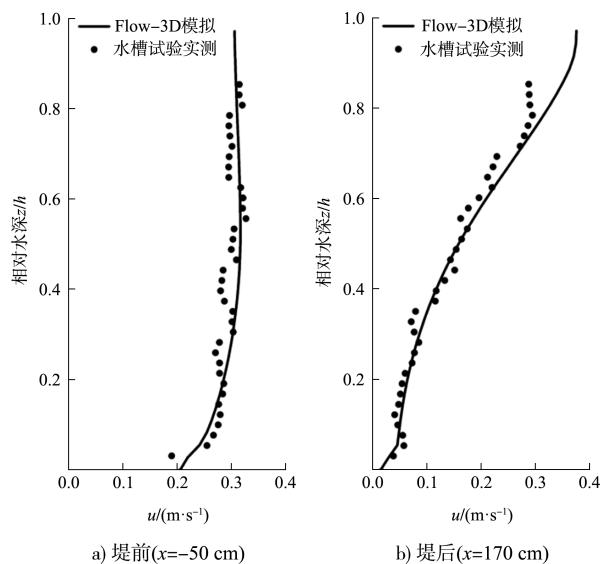


图 2 Flow-3D 垂线方向流速验证

2 模型建立

2.1 研究对象

本研究的试验对象是一种可用于航道整治工程的新型半圆形构件。如图 3 所示, 该构件整体为一空腔结构, 相对于传统的半圆形构件, 构件表面开有 15 个小孔, 孔径大小为 0.5 m, 以增强内外侧的水体交换; 前后水流贯通, 垂向上设有一带孔横向隔板, 将腔体分为上下两个区域, 孔径 0.5 m, 共布设 6 个。新型半圆形构件透水能力参数为: y 轴方向开孔面积 52.5 m^2 , z 轴方向开孔面积 2.9 m^2 , 开孔率 19.2%, 外轮廓总面积 289 m^2 。

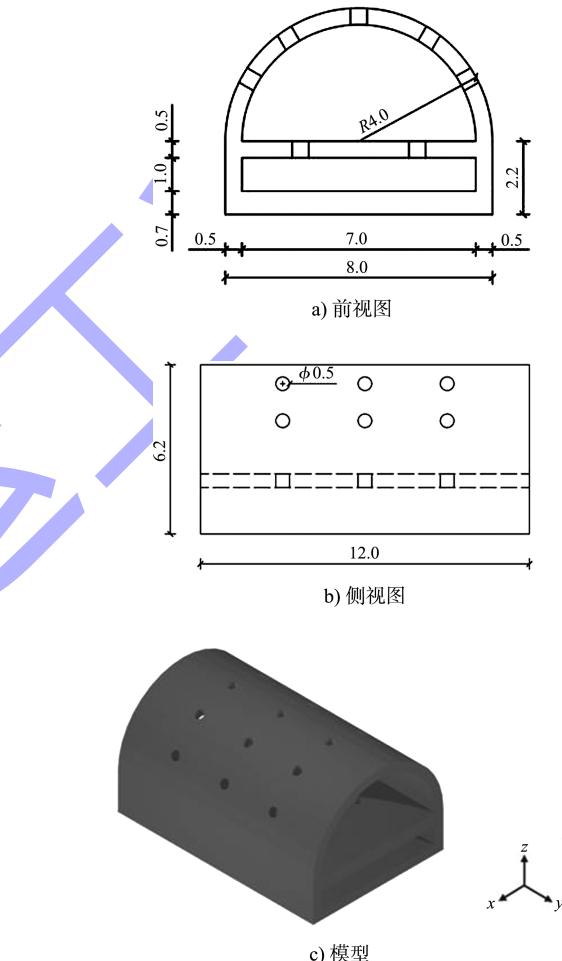


图 3 新型半圆形构件 (单位: m)

2.2 边界条件设置

数值水槽模型的建立通过 N-S 方程有限体积法离散将 Flow-3D 的 FAVOR 网格处理技术进行解析。新型半圆形构件通过 AutoCAD 建立三维模型, 将模型保存为 .stl 格式文件导入 Flow-3D 进行计算。新型半圆形构件放置在距进流 100 m 位置处,

由于周围流场变化较为复杂, 故对坝身前端 10 m 至后端 10 m 范围局部加密, 选用 0.1 m 网格, 其余部分选用 0.2 m 网格(图 4、5)。为保证数值计算的稳定性, 坎身附近至水槽其余区域过渡段网格密度渐进变化。

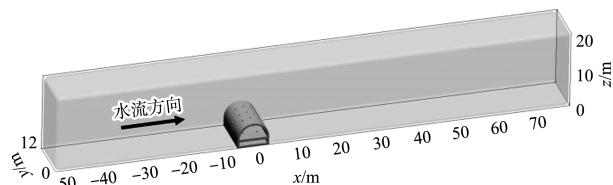


图 4 计算区域

数值水槽上边界条件 x_{\min} 选用“Specified Velocity”, 流速定为恒定流; 下边界 x_{\max} 选用“Pressure”; 数值水槽 y 轴两端 y_{\min} 、 y_{\max} 选用“Symmetry”; 槽底 z_{\min} 选用“Wall”。紊动模型采用重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型, 初始水深取 16.5 m, 计算时间为 300 s。

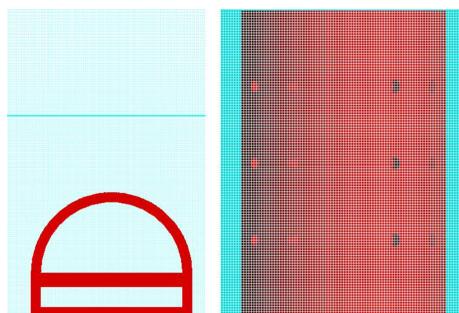


图 5 新型半圆形构件网格划分

2.3 试验工况

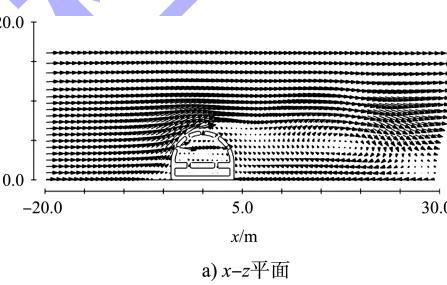
Flow-3D 数值模拟主要考虑进口平均流速这一关键因素对新型半圆形构件流场分布的影响。模拟工况试验水深为 16.5 m, 构件处于全淹没状态。由于不同流速会对构件内外侧水动力分布造成影响, 设置 3 种不同流速下的试验工况, 研究该构件的上下层腔体在水动力特性上的差异, 工况 1~3 的流速分别为 1.0、2.0、3.0 m/s。

3 试验结果

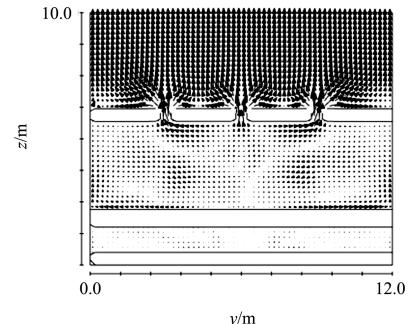
3.1 流矢分布

图 6 为新型半圆形构件在工况 1 条件下(平均流速 1.0 m/s, 水深 16.5 m)的速度矢量分布, 图

中选取 $x-z$ (构件中轴线)、 $y-z$ 平面(构件中轴线) 2 个断面进行分析。从 $x-z$ 平面的流矢分布可以明显看出, 当水流作用在构件的迎水面时, 水流在构件的阻碍作用下抬升形成上升流, 又由于过水断面的束窄, 水流流速增大。在背水面位置, 水流在构件的掩蔽下流速减小, 由于构件上方流速较大, 层与层之间存在较大的流速梯度, 加剧了构件后方的水流掺混, 构件后方($x=5 \sim 30$ m 区域)出现了长约 25 m 顺时针方向的漩涡, 从而产生了流速较小的背涡流。对于构件内部, 外部水流受迎水面的阻水影响, 在进入腔体内部时大幅衰减。构件上方的孔洞与外界水流频繁交换, 使得构件内部的流矢散乱, 腔体内部出现大小不同的漩涡。



a) $x-z$ 平面



b) $y-z$ 平面

图 6 新型半圆形构件速度矢量分布

3.2 流场分布

图 7 分别为不同来流(平均流速 1.0、2.0、3.0 m/s)条件下的 $x-z$ 平面新型半圆形构件的流速分布。可以看出, 半圆形构件上方由于过水断面面积束窄, 流速最大值出现在过水断面的上方区域, 而背水面区域的水流流速明显小于上方。同时, 由于半圆形构件在纵向上有隔板将构件分为上下 2 层, 腔体上层通过孔洞与外界水流交换, 而下层仅通过隔板上的孔洞与上层交换。因此,

上方的水流流速主要受到孔洞影响，进出流对上层流场的影响较为明显；下层流速趋近于 0 m/s，且受外界水流流速的影响甚小。

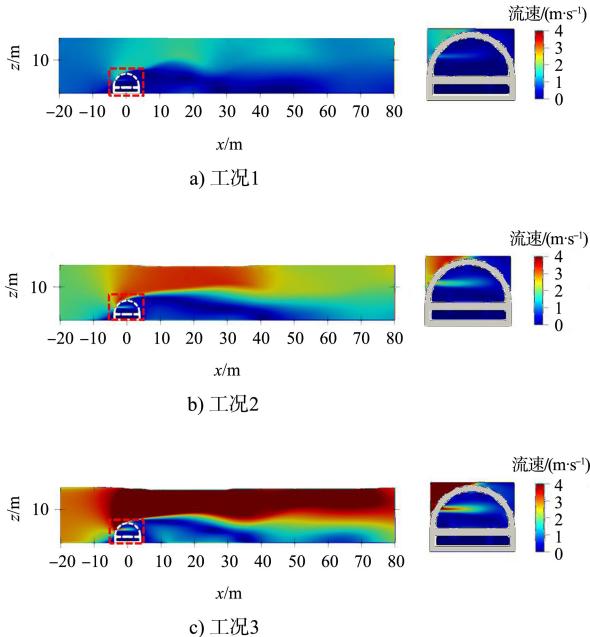


图 7 新型半圆形构件 x - z 平面流速分布

3.3 紊动能分布

图 8 为半圆形构件在 x - z 平面上的紊动能分布。图中可见，半圆形构件增强了后方的水体紊动，改变了水流流态。纵向上来看，半圆形构件在 $x=10\sim40$ m 范围内影响最为明显，这是由于在半圆形构件后方出现较大的涡旋；垂向上 $z=8$ m 附近区域流速差异最大，因此该区域的水流掺混更为剧烈，致使水体紊动能达到局部最大值，进而影响水流稳定。而这一影响随着距离增大，紊动能逐渐衰减，直至恢复正常流态。

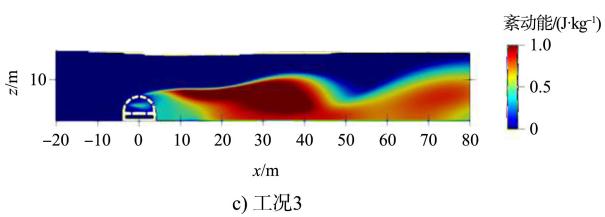
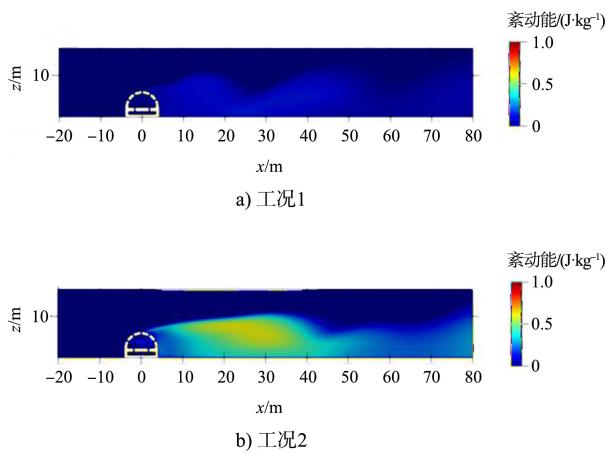


图 8 新型半圆形构件 x - z 平面紊动能分布

4 分析与讨论

4.1 水流流速对腔体内水动力特征的影响

由模拟结果可知，新型半圆形构件不仅改变了外部水动力环境，还对腔体的上下层流场特征造成显著差异。为了进一步研究腔体上下层的水动力特征，图 9 给出了半圆形构件在中轴线上 ($x=0$ m) 的垂线流速分布。可以发现，由于腔体上方存在大量孔洞， $z/h=0.15\sim0.30$ 区域出现了水平流速的极大值，且该段区域的平均流速相较于进口流速分别衰减了 80%、76% 和 84%；而腔体下方水流流速保持在 0 m/s，受外界水流流速的影响较小。这种垂线流速差异的因素一方面是由于明渠水流垂线流速的 J 形分布特征所致；另一方面是由于腔体上层的孔洞加强了内外界水流的横向交换，而下层仅通过隔板上的孔洞进行纵向交换，造成了垂线流速分布差异。

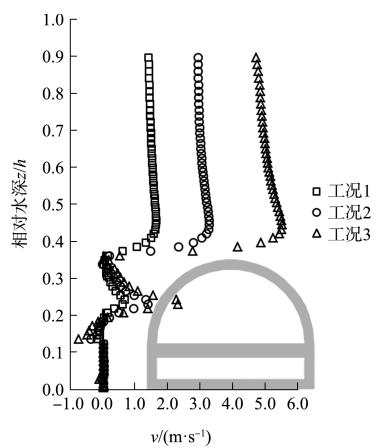
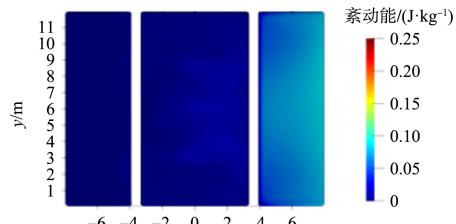


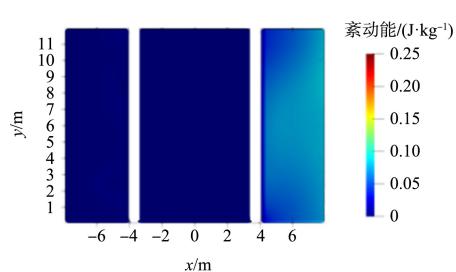
图 9 新型半圆形构件 $y=0$ m 切面垂线流速分布

图 10 为半圆形构件腔体上层 ($z=3$ m) 和腔体下层 ($z=1$ m) 的紊动能分布对比。在半圆形构件内部，紊动能分布自上而下逐渐减小，腔体上层的紊动能主要分布在出孔区域，受孔洞进出流影

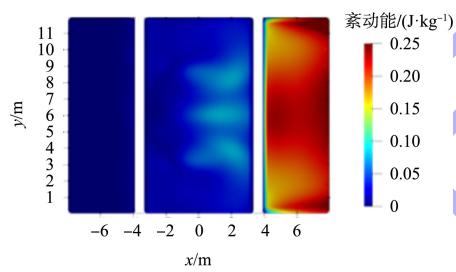
响, 紊动能随着进口流速的增大而增强; 而腔体下层的紊动能基本不受外界水流流速的影响, 趋近于 0 J/kg 。



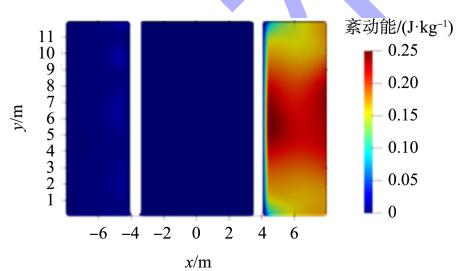
a) 工况1, 上层



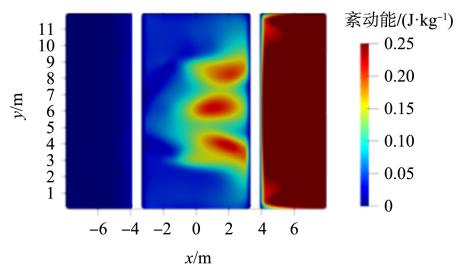
b) 工况1, 下层



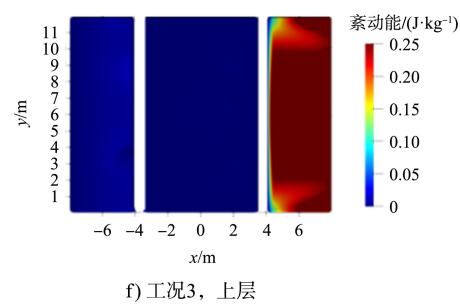
c) 工况2, 上层



d) 工况2, 下层



e) 工况3, 上层



f) 工况3, 上层

图 10 新型半圆形构件 $x-y$ 平面紊动能分布

4.2 新型半圆形构件的生态效应分析

航道整治工程的建设将改变底床的水沙动力环境, 进而影响水生生物、底栖生物的栖息、繁衍。而泥沙中丰富的有机物是底栖生物生存的关键因素^[8], 泥沙微淤的环境促使底栖生物在底质中大量繁衍, 同时也为水生动物提供良好的栖息地、索饵场, 形成良好的生态链。

由图 9、10 的试验结果可知, 新型半圆形构件上下层具有显著的流场差异, 具有不同的生态效应。由于鱼类在近底层捕食过程中具有趋流性, 构件附近形成的上升流、背涡流有利于诱集鱼类^[9]; 腔体下层的流速、紊动能大小趋近于 0, 低流速、低紊动的环境使得泥沙大量落淤, 提高了底栖生物的物种多样性和丰富度。因此, 半圆形构件内部形成了良好的索饵场、栖息地, 有利于促进生态修复。

5 结论

1) 基于 Flow-3D 数值模拟得到的水流流速拟合结果良好, 表明采用该软件研究航道整治工程中复杂构件的水动力特性是可行的。

2) 新型半圆形构件内的横隔板将腔体内上下层分为两块区域, 上方水流流速、紊动能明显大于下层, 且下层流速、紊动能基本不受外界水流流速影响。

3) 新型半圆形构件可有效提升局地的生态修复效果, 同时构件上下层具有不同的生态效应。上层内外侧水体交换频繁, 构件附近的上升流、背涡流能够诱集鱼类; 下层水流流速、紊动能较小, 使得泥沙大量落淤, 提高了底栖生物的物种多样性和丰富度。