

丁坝挑角及长度对回流区流动特性影响的数值模拟

吴伊平¹, 张岩¹, 崔鹏义¹, 黄远东¹, 张红武²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为探究丁坝挑角及长度对坝后回流区流动特性的影响, 利用计算流体力学 (CFD) 方法, 模拟宽浅河道中丁坝挑角上挑 60°、正挑、下挑 120°, 及丁坝投影长度为 0.12, 0.2, 0.3 m 条件下回流区流场和湍动能及湍流黏度的分布。结果表明: 丁坝回流区最大相对长度 L/B 及最大相对宽度 W/B 与丁坝相对投影长度 b_1/B 成正相关; 湍动能沿着流动分离区域向两侧及下游扩散衰减, 其最大值出现在坝后流动分离处; 丁坝的投影长度和挑角直接影响湍动能和湍流黏度的大小和分布; 随着水深增加, 湍动能和湍流黏度分布规律不变, 其值随着水深的增加而小幅减小。

关键词: 丁坝; 回流区; 流动特性; CFD

中图分类号: TV 131 文献标志码: A

Numerical simulation of the influence of spur dike angle and length on flow characteristics in recirculation zone

WU Yiping¹, ZHANY Yan¹, CUI Pengyi¹, HUANG Yuandong¹, ZHANG Hongwu²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study the influence of the pick angle and length of spur dike on the flow characteristics of recirculation zone behind the spur dike, the computational fluid dynamics (CFD) method was applied to simulate the flow fields and the distributions of turbulent kinetic energy and turbulent viscosity under three pick angles (60°, 90° and 120°) and three projection lengths (0.12 m, 0.2 m and 0.3 m) of spur dike. The results show that the maximum relative length L/B and width W/B of recirculation region are positively correlated with the relative projection length of spur dike b_1/B . The turbulent kinetic energy diffuses and attenuates along the flow separation zone to both sides and downstream, and the maximum value is located at the flow separation zone behind the spur dike. The projective length and angle directly affect the size and distribution range of turbulent kinetic energy and turbulence viscosity. With the increase of water depth, the distribution patterns of turbulent kinetic energy and turbulent viscosity remain the same, and the values decrease slightly with the increase of water depth.

Keywords: spur dike; recirculation zone; flow characteristics; computational fluid dynamics

收稿日期: 2018-09-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402504)

第一作者: 吴伊平 (1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 环境模拟与污染控制。E-mail: 191510111@usst.edu.cn

通信作者: 黄远东 (1964-), 男, 教授。研究方向: 环境工程及河流模拟。E-mail: huangyd@usst.edu.cn

丁坝作为一种航道整治、防洪护坡的建筑物，广泛应用于我国江河和海岸线^[1-2]。丁坝在岸边迎托水流，把水流挑离河岸保护堤岸；约束水流，控制河流宽度，稳固制导线；挑离水流进入主流加快流速，加速河流对底部河床的冲刷，增加行槽深度，提升河流输沙能力^[3]。丁坝的存在使得河流在丁坝附近的水流形态变得复杂。水流流经丁坝时，在坝头产生边界层分离，形成复杂的三维旋涡结构；在丁坝附近产生局部冲刷和淤积^[4]。丁坝上游产生的壅水现象使得水面向丁坝对岸倾斜，而在丁坝断面后水面普遍下凹。水流在丁坝坝头处产生流动分离，大部分水流进入主流，少部分回流到丁坝后端，形成回流区^[5]。

对回流区流动特性的探究是丁坝绕流问题的研究热点，回流区域的大小对横断面上流速重新分布关系密切，正确预测回流区大小，了解丁坝的掩护范围在实际工程中具有重要意义^[6]。众多学者通过水槽试验、理论分析和数值模拟等对回流区域流动特性进行探究。李国斌等^[7]从二维水深平均水流运动方程出发，推导出回流区长度和最大回流宽度计算公式，并与实测值进行了比较，但由于天然河道的复杂性，其公式的实际应用仍需进一步验证。陈稚聪等^[8]利用三维激光颗粒动态分析仪(3D-PDA)对丁坝回流区的流速进行详细测量，并根据流速分布和流量连续性原理对丁坝回流区进行详细划分，进一步研究纵向回流尺度和流量的变化规律。随着计算机硬件及数值计算方

法的快速发展，相比较水槽试验较高的成本，数值模拟方法以其较低的成本、详尽的预测数据，以及不断提高的计算精度成为当前科学研究的重要工具。曹晓萌等^[9]利用数值模拟和水槽试验相结合探究丁坝群对河流系统3个作用尺度的划分准则。郑艳等^[3]利用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，对非淹没丁坝在宽浅河道中形成的流场进行了二维数值模拟，结果表明丁坝的相对长度和河宽束窄系数呈线性相关。

然而丁坝挑角及长度对回流区流动特性影响的研究还相对较少，实际流动中水流流向和丁坝不可能是理想的垂直状态(即丁坝挑角为 90°)，所以本文从丁坝挑角出发，结合丁坝长度变化，利用数值模拟的方法探究丁坝挑角和长度对回流区大小和水流紊动特性的影响。

1 数值模型及验证

1.1 数值模型和方法

基于曹晓萌等^[9]的水槽试验模型，建立本研究的数值模型，如图1所示。考虑宽浅河道， X 方向为水流方向，设计长度为20 m； Y 方向为河宽方向，设计长度为1.2 m。坝体为非淹没丁坝，其固定在模型下侧，距离进口断面6 m处。丁坝投影长度 b_1 (丁坝在垂直于水流方向的平面上的投影)分别为0.12, 0.2, 0.3 m，在相同投影长度下分别设置挑角为 60° , 90° 和 120° 。设计进口断面体积流量为 $0.0618\text{ m}^3/\text{s}$ ，河道入口水深0.3 m。

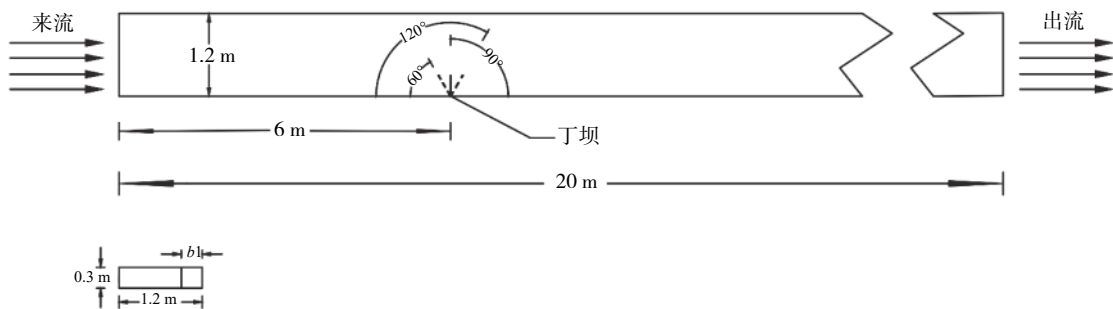


图1 数值模型二维平面图
Fig.1 Numerical model two-dimensional plan

根据图1给定的数值模型，设计计算区域大小为长20 m、宽1.2 m和高0.3 m。利用 Gambie2.4.6 进行网格划分，采用混合网格和局部加密技术对计算区域进行网格划分。图2(a)为其中一种工况下的平面二维网格示意图(采用混合网

格)。为更好地探究丁坝附近流场变化，对丁坝附近网格进行局部加密，如图2(b)所示。最小网格尺寸在坝头处为0.001 25，相邻网格按照 $1:1.04 \sim 1:1.08$ 增长率递增，各工况网格总数均在50~60万。

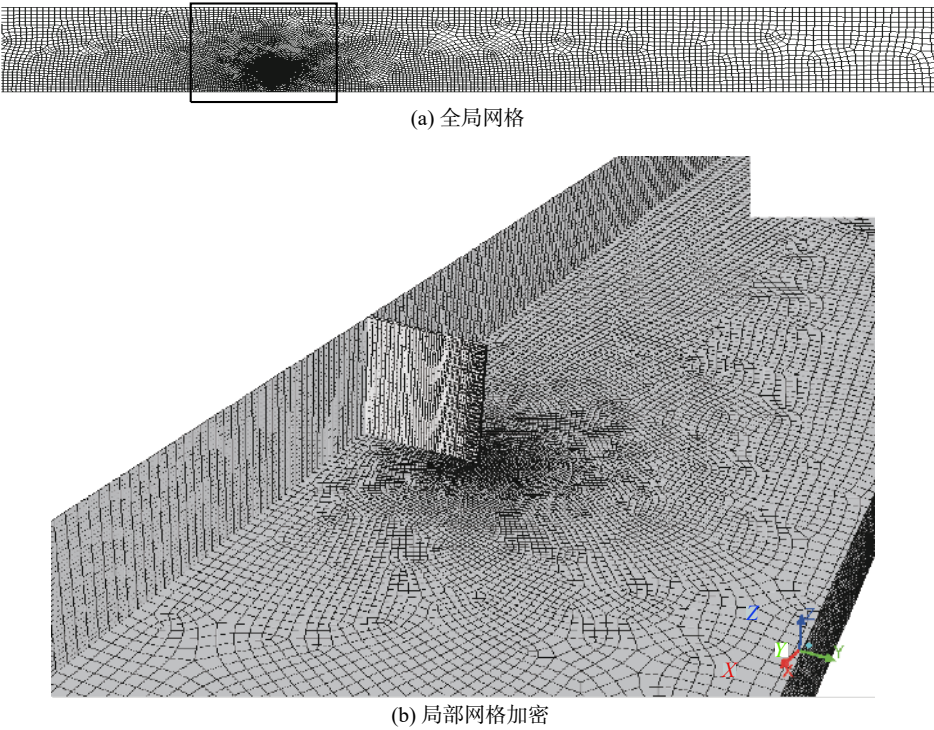


图 2 网格划分示意图

Fig.2 Diagram of mesh generation

进口为速度入口，速度大小为 0.172 m/s(由体积流量和设计水深确定)；出口为自由出流；模型的底面、侧面和坝体表面都设置为速度无滑移的壁面边界条件；上表面采用刚盖假定，对应顶部边界设置为对称边界。采用 Fluent 作为计算软件，选用压力基求解器，压强和速度耦合采用 Simple 算法，对流项离散选用二阶迎风格式。

1.2 控制方程

采用三维稳态 Navier-Stokes 方程来描述非淹没丁坝绕流，其控制方程如下。

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i \tag{2}$$

式中： x_i, x_j 分别为 i, j 方向上的坐标； u_i, u_j 分别为流体时均速度在 i, j 方向上的分量； ρ 为水的密度； p 为流体压强； μ 为分子粘滞系数， μ_t 为湍流黏性系数； g_i 为重力加速度在 i 方向上的分量。

采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10]对方程组进行封闭，湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 的输运方程分别为

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho G - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\rho \varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \tag{4}$$

湍流黏性系数

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

湍动能产生项

$$G = \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{6}$$

式中： $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 均为经验常数，其取值分别为 0.09, 1.0, 1.3, 1.44, 1.92。

1.3 模型验证

采用文献^[9]的试验数据对本研究数值模型进行验证。试验中正挑丁坝长度为 0.3 m，采用超声波多普勒测速仪(ADV)对坝前 0.2 m 和坝后 0.4 m 处 X 方向上的流速 U_x 进行测量。验证结果如图 3 所示，可见坝前坝后速度的数值模拟和试验测量结果在数值和分布趋势上都十分吻合，表明数值模型采用的相关参数可以合理地模拟非淹没丁坝的绕流运动，因此采用上述模型设置对本文其他工况进行研究。

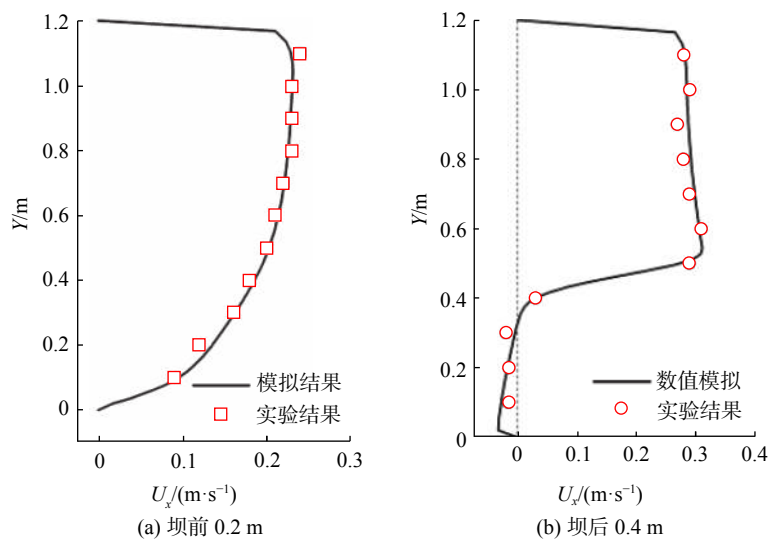


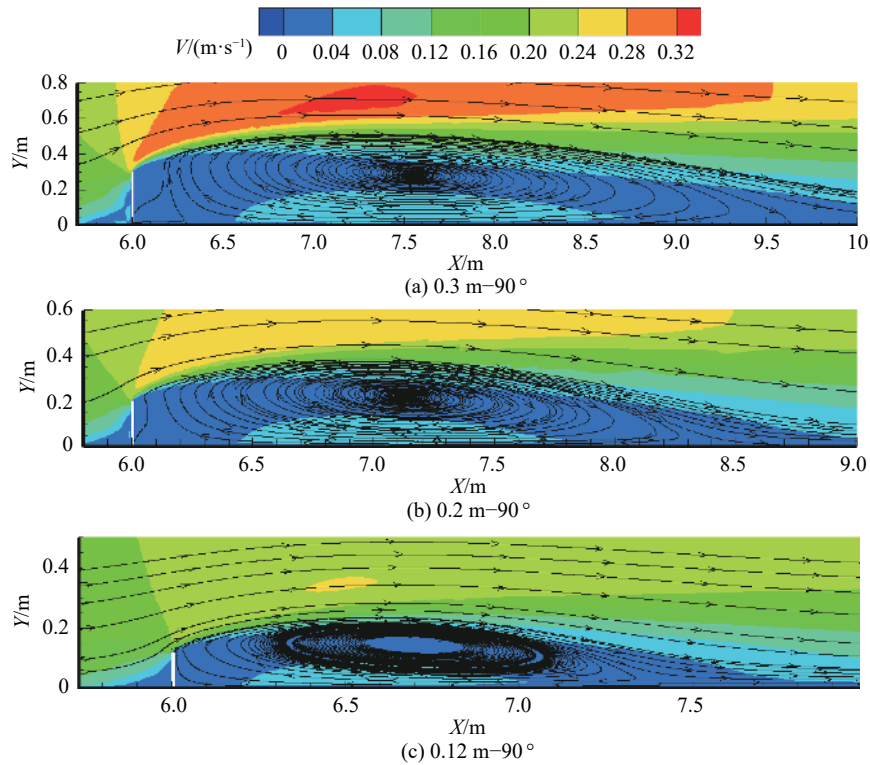
图 3 模型验证
Fig.3 Model validation

2 结果分析

2.1 流场和回流尺度

9 种工况下计算所得水面处速度云图如图 4 所示。从图中可以看出，由于丁坝的挑流作用，当水流流经丁坝时，主流收缩，流速 V 明显增大，在丁坝下游形成明显的顺时针旋涡。从研究的不同工况可知：a. 同一丁坝挑角下，随着丁坝长度的增加，主流收缩程度增大，流经丁

坝的水流速度增大，并且达到最大收缩断面的距离增加，沿程扩散的速度也增大，主流沿程扩散的距离增长；而在流线条中水流流经丁坝，在丁坝后形成不同尺度的顺时针旋涡。b. 同一投影长度下，随着丁坝挑角的增加，坝后回流区产生的旋涡涡心向下游移动，但与坝头之间的水平距离基本保持不变。c. 同一投影长度下，不同挑角的丁坝，流速分布云图和流线条分布规律基本一致。



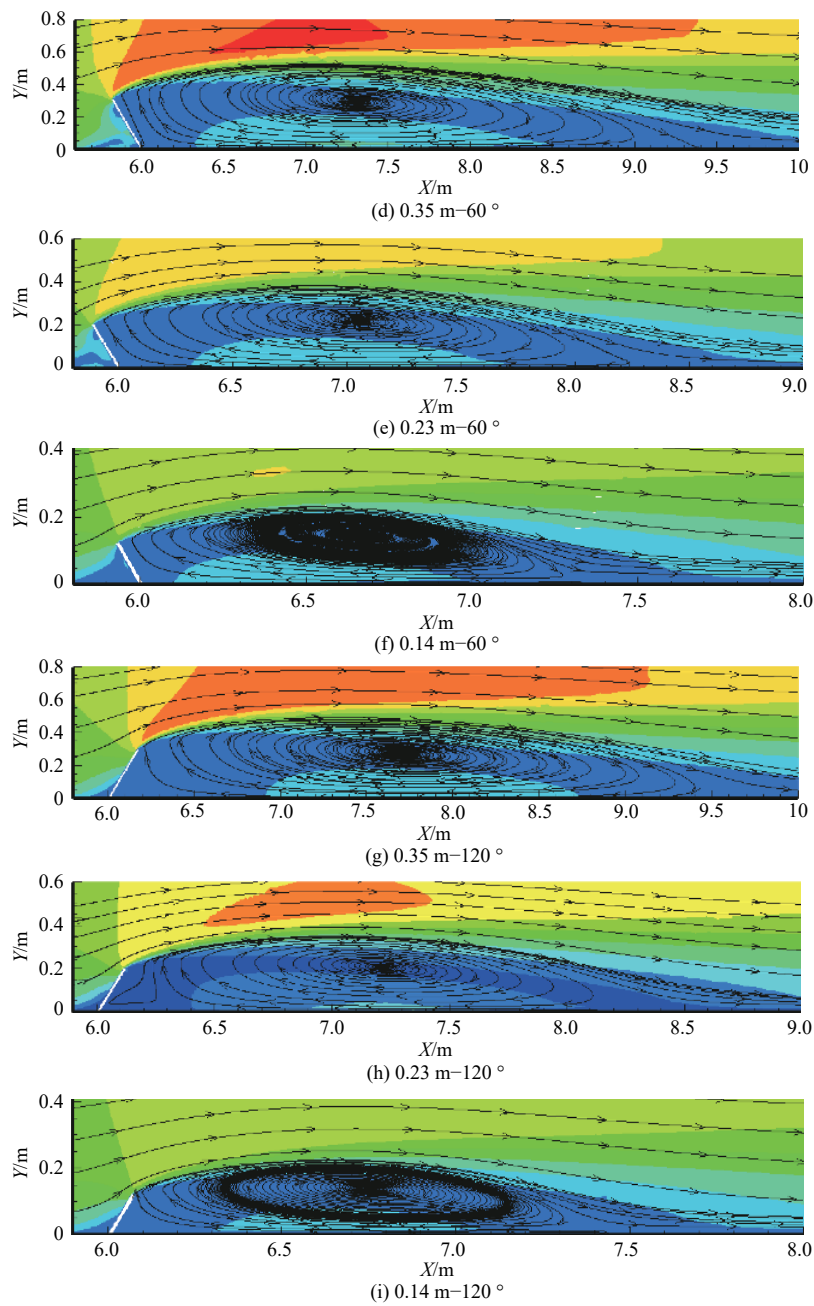


图 4 水面速度云图及流线图（丁坝长度-角度）

Fig.4 Water surface velocity contours and streamlines

为研究丁坝挑角及投影长度对坝后回流区尺寸的影响，表 1 列出了所研究工况坝后回流区的长度和宽度。总体来看，所有工况最大回流区长度均在 1 ~ 3.5 m 之间，相同角度下，随着投影长度的增加，回流区长度也增加，这和其他学者试验测量结果一致。表 1 给出了最大回流区长度 L 与丁坝投影长度 b_1 的比值 L/b_1 ，可以得出：丁坝坝后的回流区长度与丁坝的投影长度有关，且回流区长度一般是丁坝投影长度的 11 倍；另外，随着丁坝投影长度的增加， L/b_1 基本不变。研究

表明，丁坝相对投影长度 b_1/B 与最大相对回流长度 L/B 成正相关，其线性关系为： $L/B = 1.910 b_1/B + 1.226 (R^2 = 0.86, R \text{ 为相关系数})$ 。

另外，坝后最大回流宽度同样随着丁坝投影长度的增加而增大，且与丁坝的投影长度相关。一般坝后最大回流宽度是丁坝投影长度的 1.7 ~ 2 倍左右，且随着长度的增加，倍数略微减小。分析表明，丁坝的相对投影长度 b_1/B 与最大相对回流宽度 W/B 成正相关，其线性关系为： $W/B = 0.274 b_1/B + 0.206 (R^2 = 0.91)$ 。

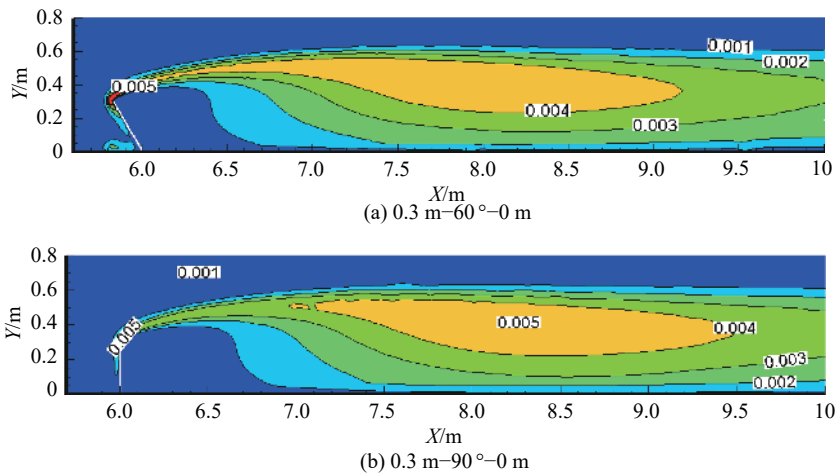
表 1 所研究工况坝后回流区尺寸
Tab.1 Dimension of recirculation zone behind spur dike in this study

丁坝长度 b/m	角度/ $^\circ$	丁坝投影长度 b_1/m	河宽 B/m	最大回流长度 L/m	最大回流宽度 W/m	L/b_1	W/b_1	b_1/B	W/B	L/B
0.12	90	0.12	1.2	1.34	0.24	11.17	2.00	0.10	0.20	1.12
0.20	90	0.20	1.2	2.25	0.37	11.25	1.85	0.17	0.31	1.88
0.30	90	0.30	1.2	3.34	0.52	11.13	1.73	0.83	0.43	2.78
0.14	60	0.12	1.2	1.37	0.24	11.42	2.00	0.10	0.20	1.14
0.23	60	0.20	1.2	2.36	0.38	11.80	1.90	0.17	0.32	1.97
0.35	60	0.30	1.2	3.33	0.52	11.10	1.73	0.83	0.43	2.78
0.14	120	0.12	1.2	1.32	0.24	11.00	2.00	0.10	0.20	1.10
0.23	120	0.20	1.2	2.14	0.35	10.70	1.75	0.17	0.29	1.78
0.35	120	0.30	1.2	3.21	0.51	10.70	1.70	0.83	0.43	2.68

2.2 湍动能分布

为研究丁坝设置对所产生的湍流混合作用强弱的影响，选取几个不同丁坝、不同水深处的代表工况，对其湍动能分布云图进行分析，如图 5 所示。从流线图可以看出，湍动能主要分布在回流涡区的下游，湍动能最大值出现在回流区末端与主流交汇处。水流流经丁坝，在坝头位置开始产生流动分离，湍动能产生并沿着流动分离区域向两侧及下游逐渐衰减。图 5(a)~(c)为 3 种挑角下投影长度为 0.3 m 的丁坝水面的湍动能分布，可以看出湍动能分布区域在不同丁坝挑角下基本一致，回流区湍动能最大值与回流区涡心的相对位置基本保持不变；坝头处随着角度的增加湍动能最大值从 60°的 $0.01\text{ m}^2/\text{s}^2$ 减小为 120°的 $0.005\text{ m}^2/\text{s}^2$ ，这是由于丁坝与来流流线方向的角度不同导致丁坝对主流挑流作用的强弱不同引起的。当

丁坝角度小于等于 90°时，丁坝对主流流动起到抑制作用，此时流动分离更为剧烈，因此湍动能变大；当丁坝挑角大于 90°时，丁坝承接主流，随着角度的增大，流动分离现象变弱，因此湍动能减小。图 5(b)、(d)、(e)为 90°丁坝、不同投影长度下、水面处的湍动能分布，可以明显看出投影长度直接影响湍动能分布区域，投影长度越长，其湍动能影响范围越大；且随着投影长度的增加，湍动能最大值也增加，这是由于投影长度越长，坝头处水流流速越大，流动分离越为剧烈，因此产生的湍动能越大。图 5(c)、(f)、(g)为 120°丁坝投影长度 0.3 m 下、不同水深处的湍动能分布，可以看出，随着深度的增加，湍动能分布规律相似，但湍动能的平均值减小，代表相同湍动能等值线范围也减小。



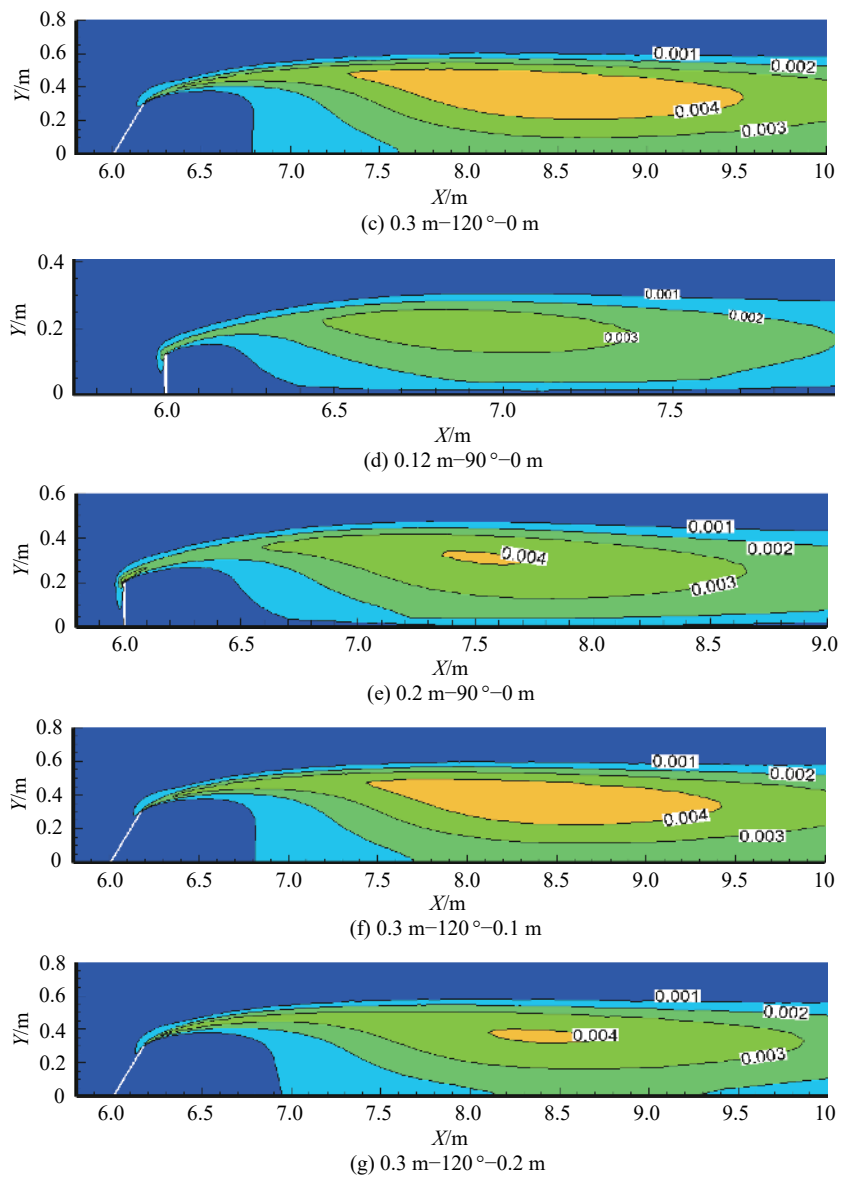


图 5 湍动能分布图 (投影长度–角度–水深)

Fig.5 Contours of turbulent kinetic energy (projection length–angle–water depth)

2.3 湍流黏度分析

湍流黏度 μ_t 是表征能量耗散度的量^[11], 其表达式如式(5)所示, 它是空间坐标的函数, 表征流动的状态, 而非物性参数。提取 9 种工况下不同深度的湍流黏度分布并作图分析, 选取具有代表性的工况如图 6 进行说明。从图 6 可知, 湍流黏度分布区域与湍动能类似, 不过湍流黏度最大值的位置靠近河岸。

图 6(a)~(c)为丁坝投影长度 0.3 m、不同挑角情况下水面处的湍流黏度分布。相同投影长度下, 不同角度回流区的湍流黏度影响区域基本一致, 但分布规律存在差别。从云图可以看出, 随着角度的增大, 相同的等值线的范围扩大, 代表相同湍流黏度影响范围增大, 并且湍流黏度的最

大值向回流区河岸靠近。另外, 研究发现, 不同投影长度下, 其回流区湍流分布情况基本一致, 研究选取 90°丁坝进行分析, 如图 6(b)、(d)、(e)所示, 从云图可以明显看出湍流黏度主要分布在回流区及其下游; 并且当投影长度增加时, 湍流黏度影响范围增大, 相应湍流黏度最大值也随之增大。图 6(c)、(f)、(g)为投影长度 0.3 m、挑角 120°下不同水深处的湍流黏度分布, 可以看出, 不同水深处湍流黏度分布规律基本一致, 在水面处 (即水深为 0) 平均值最大, 随着水深的增加, 相同大小湍流黏度的范围逐渐缩小, 但其最大值位置与涡心的相对位置基本保持不变。另外, 研究发现, 不同挑角、不同长度的丁坝沿水深方向的湍流黏度分布规律基本一致。

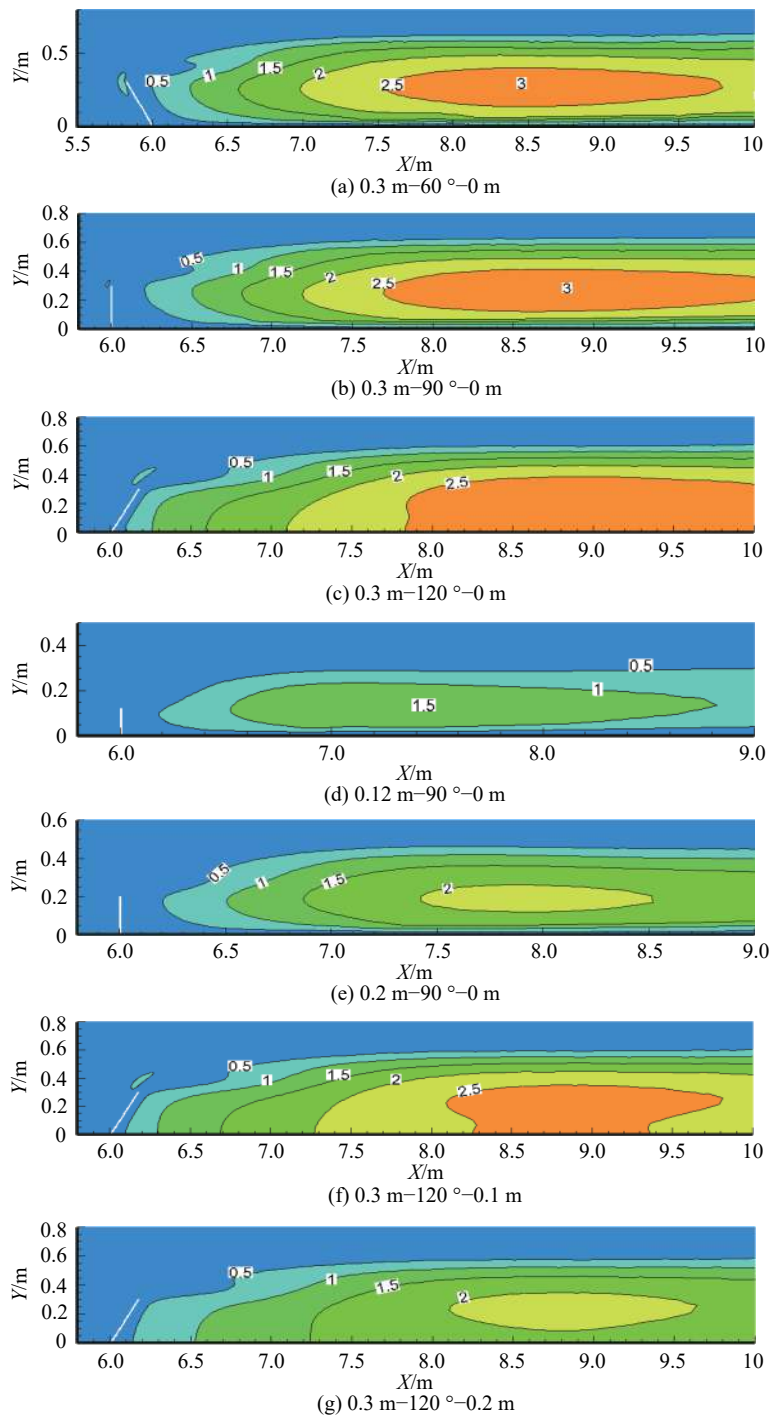


图 6 湍流黏度分布图 (投影长度-角度-水深)

Fig.6 Contours of turbulent viscosity (projection length-angle-water depth)

3 结 论

采用试验验证的数值模型研究了丁坝挑角及长度对回流区流动特性的影响,可以得到以下结论:

a. 丁坝坝后的最大相对回流区长度 L/b_1 及相对宽度 W/B 与丁坝相对投影长度 b_1/B 成正相关,

线性关系为 $L/B = 1.910 b_1/B + 1.226 (R^2=0.86)$ 及 $W/B = 0.274 b_1/B + 0.206 (R^2=0.91)$ 。

b. 湍动能最大值出现在坝后旋涡右上方的流动分离处,其距离坝头的相对位置基本保持不变。具体表现为当投影长度为 0.12 m 时,其距离坝头约为 0.9 m;投影长度为 0.2 m 时,其距离坝头约为 1.6 m;投影长度为 0.3 m 时,其距离坝头约为

2.4 m。湍动能产生后沿着流动分离区域向两侧及下游逐渐衰减。坝后湍动能的分布与丁坝的投影长度有关。

c. 湍动能和湍流黏度分布主要集中在回流区末端和河流下游。丁坝的投影长度直接影响湍动能和湍流黏度的大小和范围；丁坝挑角对坝头湍动能影响较大，挑角越小坝头湍动能越大；同一丁坝情况下湍动能和湍流黏度随着水深的增加其分布规律不变，其值随着水深的增加而小幅减小。

参考文献：

[1] DUAN J G, HE L, FU X D, et al. Mean flow and turbulence around experimental spur dike[J]. [Advances in Water Resources](#), 2009, 32(12): 1717–1725.

[2] MAYERLE R, WANG S S Y, TORO F M. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes[J]. [Journal of Hydraulic Research](#), 1995, 33(2): 243–256.

[3] 郑艳, 魏文礼, 刘玉玲. 丁坝长度对回流长度影响的数值模拟研究[J]. [沈阳农业大学学报](#), 2014, 45(2): 195–199.

[4] 徐晓东. 非淹没正交双体丁坝的水流特性及作用尺度研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[5] 韩玉芳. 丁坝的造床作用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.

[6] 黑鹏飞. 丁坝回流区水流特性的实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.

[7] 李国斌, 韩信, 傅津先. 非淹没丁坝下游回流长度及最大回流宽度研究[J]. [泥沙研究](#), 2001(3): 68–73.

[8] 陈稚聪, 黑鹏飞, 丁翔. 丁坝回流分区机理及回流尺度流量试验研究[J]. [水科学进展](#), 2008, 19(5): 613–617.

[9] 曹晓萌, 顾正华. 3 种非淹没双体丁坝作用尺度划分准则及比较[J]. [浙江大学学报\(工学版\)](#), 2015, 49(2): 200–207.

[10] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. New York: Academic Press, 1972.

[11] 郜冶, 刘乾坤, 陈宇翔. FBM 湍流模型水翼空化绕流数值研究[J]. [哈尔滨工程大学学报](#), 2013, 34(1): 92–97.

(编辑：董 伟)