

流凌条件下弯道水力特性数值模拟

李民康¹, 冀鸿兰¹, 罗红春¹, 郜国明², 张宝森³

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;
2. 黄河水利科学研究院国际合作与科技局, 河南 郑州 450003;
3. 黄河水利科学研究院防汛抢险技术研究所, 河南 郑州 450003)

摘要:采用 VOF 技术, 利用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 结合拉格朗日粒子模型, 通过建立弯曲度不同的弯道, 对流凌条件下弯道的水力特性进行了模拟研究。结果表明:流凌过弯后主要集中在凹岸, 集聚明显;流凌的存在增大了凹岸表层水流的横向环流, 在一定程度上影响凸岸底部大环流的发展;各弯道进口断面最大水面流速均大于出口;随弯曲度的增大, 冰水流凹岸低流速区和高紊动能区呈扩大趋势, 弯顶断面主流区逐渐向凸岸偏移。

关键词:流凌; 弯道; 冰颗粒; 水力特性; 数值模拟

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)03-0041-09

Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions//LI Minkang¹, JI Honglan¹, LUO Hongchun¹, GAO Guoming², ZHANG Baosen³ (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Bureau of International Cooperation and Technology, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3. Flood Control Technology Research Institute, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The hydraulic characteristics of the curves under the conditions of ice flow were simulated by establishing bend channels with different curvatures based on the volume of fluid (VOF) technology, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and the Lagrangian particle model. The results show that the ice mainly concentrates on the outer bank after passing the curve with obvious gather. The existence of ice increases the lateral circulation of the surface current on the outer bank, which affects the development of the large circulation at the bottom of the inner bank to a certain extent. The maximum water surface velocity at the inlet section of each curve is greater than the outlet. With the increase of the curvature, the outer bank area of the low-velocity flow and the high turbulent kinetic energy area of the ice flow stream continue to increase, and the mainstream area of the curved top section gradually shifts to the inner bank.

Key words: ice flow; channel bend; ice particle; hydraulic characteristics; numerical simulation

封冻期河冰演变过程包括成冰、流凌、初封、稳封、融冰、开河过程,冰花的迁移贯穿在整个封冻期,是河冰变化过程中不可或缺的一部分^[1],冰在水体中随水流流动称为流凌,可分为封冻前结冰流凌和开河期解冻流凌,前者以冰花为主,后者以碎冰为主。流凌的输移演变改变了河道边界条件和水力特征,河道堆冰容易形成冰塞冰坝,在弯道险工处尤为明显,冰塞冰坝引起过流断面减小,壅高上游水位,易形成凌汛险情。在数值模拟分析领域,目前对流凌和水内冰的研究颇具代表性。茅泽育等^[2-3]采用河道冰水耦合模型及垂向二维紊流模型,对天然河道冰塞、水内冰演变、河冰过程等进行了模拟;樊霖等^[4]根据冰/水力学、热力学建立数值模型模拟伊丹河封冻期冰情演变;王军等^[5]基于多相流理论,对流体相和颗粒相建立数学模型,得到冰颗粒的迁移规律;李超等^[6]基于二维 DynaRICE 河冰模型对三湖河口弯道水力特性及卡冰过程进行数值模拟,并分析了弯道卡冰机理;Shen^[7]利用 SPH 法模拟河冰二维运动,在 RICE 和 DynaRICE 模型的基础上改进了河冰模拟系统 CRISP,可模拟冰塞演变及冰颗粒迁移等河冰过程;倪宝玉等^[8]利用 FLUENT 模拟了波浪与冰的耦合作用,获得了多浮冰耦合效应;金

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508401);国家自然科学基金(51969020);内蒙古自治区应用技术与开发资金(201802104)
作者简介:李民康(1995—),男,硕士研究生,主要从事河冰动力学及数值模拟研究。E-mail:1392306065@qq.com
通信作者:冀鸿兰(1970—),女,教授,博士,主要从事寒区河冰过程与河流泥沙运动力学研究。E-mail:honglanji@sina.com

占军^[9]利用 RNG- $k-\varepsilon$ 湍流模型和流体体积法 (Volume of fluid, VOF) 方法,对冰水两相流浮冰受力、冰水两相流中浮冰的翻转下潜进行了研究;冀鸿兰等^[10]基于可变模糊聚类循环迭代模型对流凌的输移发展进行分析,预报了巴彦高勒站流凌日期;张莹^[11]利用 PIV 实验研究与 SPH 数模结合的方法对单/双颗粒流场特性进行了研究;刘寒秋等^[12]通过欧拉-拉格朗日双向耦合法,对冰晶影响下的管道冲刷磨损进行了研究;邓义斌等^[13]研究了冰水两相流在不同因素影响下的管道阻力特性,对冰水两相流动的阻力特性进行数值模拟研究;王晓玲等^[14]建立了三维非稳态欧拉两相流模型,模拟分析了不同转弯半径对弯道排冰的影响;姜坤^[15]利用弯道水槽,基于 FLUENT-EDEM 耦合的三维两相流数值模型,对冰颗粒的输移特性进行了研究。

以上研究主要是利用各类方法对冰水两相流的内在机制进行探讨,或在特定约束条件(弯道)下进行冰水耦合运动的分析。然而,弯道几何特性如曲率半径、弯曲度、宽深比等,对水流结构、泥沙输移及多相流耦合过程有着重要影响,其中,吴新宇等^[16]以若尔盖盆地实测资料为基础,建立水动力数学模型,分析了弯曲河流颈口裁弯过程中的水流运动特性。然而在流凌条件下,弯道几何特性的研究还需进一步深入。本文利用 VOF 技术,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,对弯道几何特性中的弯曲度进行建模分析,利用 CAD 构建 4 种典型对称弯道,类型为大曲率比宽浅明流,底坡为平底坡。将流凌简化为球体颗粒,主要研究封冻前期结冰流凌的迁移,以及冰水耦合作用下弯道水力特性,探究冰水耦合作用下弯曲度不同弯道的流凌分布、水位、流速、湍动能(TKE)等指标的基本变化规律。

1 数值模型

1.1 水流控制方程

基于笛卡尔坐标的水流连续性方程和动量方程为

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i - \frac{\tau_{bi}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: u_i 为第 i 个方向($i=1,2,3$)的速度分量; x_i 为第 i 个方向的空间坐标; p 为压强; ρ 为流体密度; G_i 为第 i 个方向的重力加速度; τ_{ij} 为黏性应力; τ_{bi} 为壁面剪应力,其在靠近实体边界处激活。可使用有限体积法结合流体体积法 (VOF) 来求解水流控制方程,以跟踪液体表面,并在液体表面应用适当的动力

边界条件。还可利用广义最小残差求解器 (GMRES) 求解压力和速度。

1.2 湍流模型

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型可考虑旋流及反映平均应变率的主流^[17],适应于高剪切和分离区域,尤其适用于颗粒流情况下复杂水流的模拟,因此采用了 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟冰水两相流。

湍流模型由以下脉动能 k 和耗散率 ε 的输运方程组成:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k v_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k v_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4)$$

其中

$$R = \frac{c_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{(1 + c_3 \eta^3) k}$$

$$V_{\text{eff}} = v_t \left(1 + \sqrt{\frac{c_\mu k}{\mu \sqrt{\varepsilon}}} \right)^2$$

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{k}{\varepsilon}}$$

式中: v_t 为流体涡黏度系数; μ 为流体动力黏滞系数;模型参数 $c_{\varepsilon 1} = 1.42$, $c_{\varepsilon 2} = 1.68$, $c_3 = 0.012$, $\eta_0 = 4.38$, $c_\mu = 0.085$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ 。模型中 R 的存在使湍流对平均应变速率更敏感。

1.3 粒子的动力学控制方程

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = -\frac{1}{\rho_p} \nabla P + \mathbf{g} + \beta (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \left| \mathbf{u} - \mathbf{u}_p \right| \frac{\rho}{\rho_p} + \frac{m_{\text{added}}}{m_p} \left(\frac{d\mathbf{u}}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \right) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}_p$, ρ_p 分别为粒子的平均速度和密度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{u}$ 为流速; $\beta = \frac{3}{4d} C_D$ 为与阻力相关的系数; d 为粒子粒径; C_D 为阻力系数; m_p 为粒子质量; m_{added} 为附加流体质量。

拉格朗日粒子的扩散根据 Monte Carlo 方法进行计算,粒子之间不会相互影响。采用基于经验公式导出的阻力模型,该模型将阻力系数和球体与其周围流体的相对速度关联以计算阻力^[18]。

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \quad (6)$$

式中: C_D 与阻力 F_D 的关系为 $C_D = \frac{8 |F_D|}{\rho U^2 \pi d^2}$; Re 为雷诺数; $U = \|\mathbf{u} - \mathbf{u}'\|$ 。

粒子-流体耦合模型将离散质量粒子的动量与连续流体隐式耦合,两者的相互作用主要是动量交换,最终理论上颗粒的运动主要受重力、黏滞力、两相拖曳力以及根据压力梯度计算出的浮力等影响。描述每个相的方程式必须同时求解,两相动量耦合表示为阻力系数与相间相对速度的乘积。两相耦合基本方法:①根据未知的流体速度计算新的粒子速度;②将粒子速度代入流体动量方程中,并求解新的流体速度;③计算两相阻力及粒子速度^[19]。

而颗粒与边界(壁边界)亦会产生碰撞,存在能量损失,所以模拟考虑恢复系数。该系数将颗粒与壁面碰撞前后的速度分为切向和法向速度,反射后与反射前粒子的法向速度分量之比即为恢复系数 r ,当 $r=1.0$ 时,则在反射过程中不会发生粒子动能损失。

1.4 FAVOR 技术

自由表面边界和流体界面使用流体体积法 VOF 处理;对任意网格点,若被流体占据则体积分 $F=1$,否则 $F=0$ 。 F 是一个以 0 和 1 为边界的连续函数,由对流传输方程控制:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (Fu_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

模拟采用 FAVOR 技术(fractional area /volume obstacle representation)来定义计算域,可在欧拉网格内定义实体边界,通过确定部分单元中开放面积和体积的分数模拟复杂形状。定义边界的过程独立于网格进行,消除和顺滑不平整区域,且可在特定区域做加密处理。

2 模型验证

2.1 粒子输移验证

通过对流凌拟颗粒化进行简化,引入具有离散相的冰颗粒,在此参照文献[20],对引入颗粒的扩散性进行分析验证。试验内容为 2000 个标记粒子初始条件下向 x 方向扩散,扩散系数为 $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$,图 1 中展示了颗粒浓度分布,以总粒子数作无量纲化处理,以理论高斯曲线分布作为对比。可以看出,理论曲线和模拟曲线吻合良好,拉格朗日粒子模型可有效描述粒子扩散。

2.2 弯道水动力学模型验证

以 Shukry 弯道水流试验对 CFD 的水动力学模块进行验证^[21]。Shukry 矩形水槽弯道上游采取流量边界,给定初始水位 0.3 m ,同时给定恒定流量 $0.072 \text{ m}^3/\text{s}$,沿程使用壁边界,下游使用压力出口,控制出口水位 0.28 m 。该数值模拟激活重力、湍流模型及密度变化模型,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,对数值运算步长及压力迭代机制等进行参数控制,满

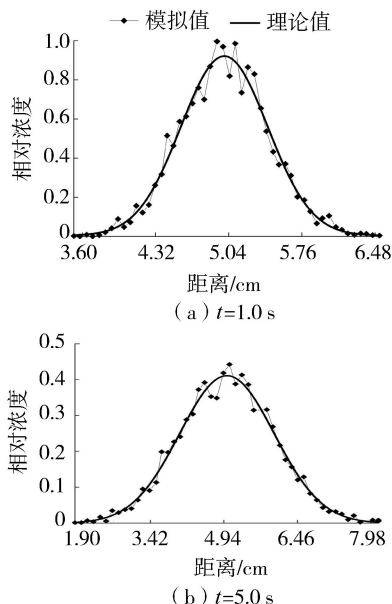


图 1 不同时刻无量纲化点源粒子分布与理论高斯分布的比较

足收敛性条件,对弯道速度、水位的实测值与模拟值进行对比验证,如图 2 所示。由图 2 可见,该模型平面流速与试验等值线图基本一致,最大流速在进口近凸岸处,在弯顶自凹岸向凸岸递增,在出口近凹岸侧。虽弯道速度最大值与试验值略有出入,但能够模拟出水动力轴线的迁移,较好地反映了实际水流水力特性。

模拟与实测水位变化范围均在 $0.20 \sim 0.33 \text{ cm}$ 之间,水位在弯道处呈现凹岸向凸岸递减的趋势,能够模拟水位凹岸高、凸岸低的水位特征。因此,采用的水动力学模型可用于模拟弯道三维水流运动特性。

3 模型建立及边界条件

参考周建银^[22]被广为引用的系列水槽试验,建立单一弯道模型,其曲率半径与水槽模型一致,对入口、出口直道段及水槽高度进行适当延长加高,以满足拉格朗日粒子的充分输移。分别建立弯曲度不同的单弯模型,其中水槽弯曲段中心线半径长为 8.53 m ,弯曲度分别为 60° 、 90° 、 150° 和 180° ,中心线曲率比为 3.645 ,弯道底坡为平底坡。两个连接直道段长 15 m ,宽 2.34 m ,高 1.2 m ,初始水深 0.8 m ,模型尺寸如图 3 所示。

上游均采用流量进口,设置流量 $q=1.872 \text{ m}^3/\text{s}$,进口水位 0.8 m ,水流弗劳德数 $Fr=0.357$,平均流速 $v_{av}=1 \text{ m/s}$, $Re=470422.7$ 。下游采用压力出口,水位控制在 0.65 m ,流体经过区域采用壁边界,顶边界为大气压。采用结构化矩形网格,最小网格尺寸为 $0.12 \text{ m} \times 0.12 \text{ m}$,计算时间 200 s 。参考野外实测数据,流凌前期冰花尺寸在 5 cm 左右,拉格朗日粒子

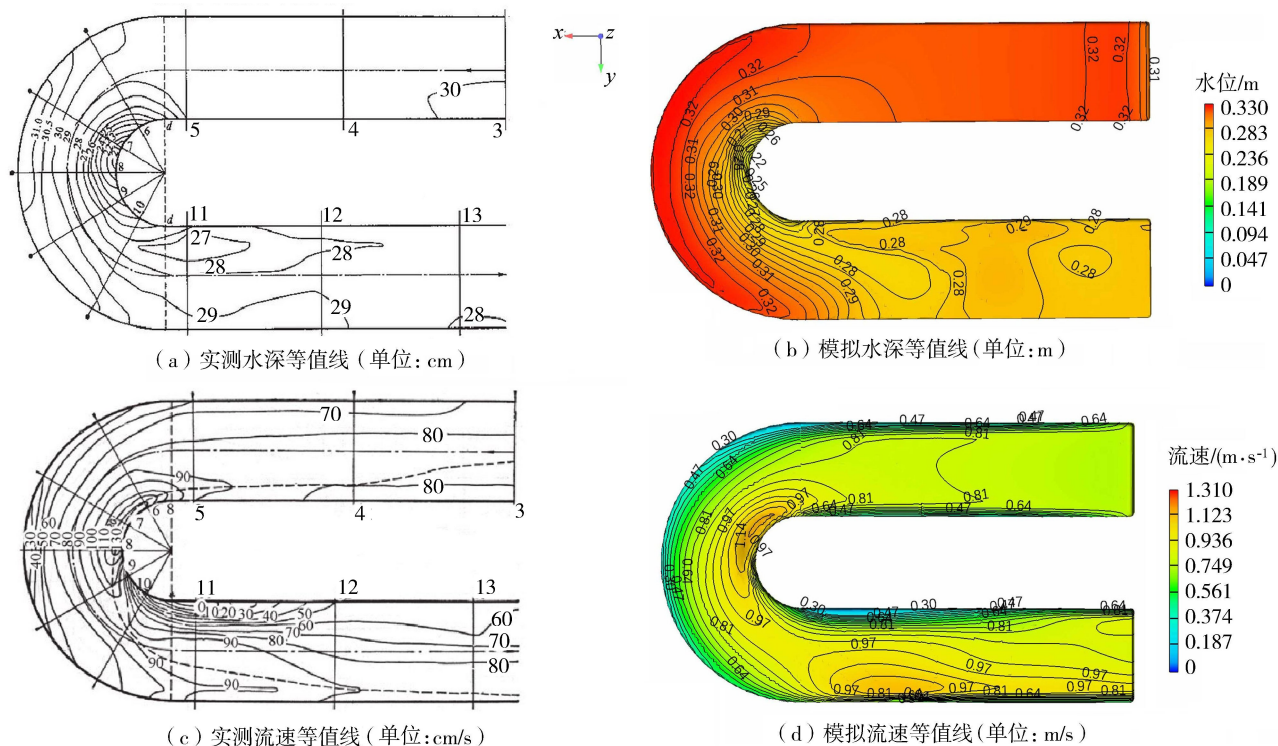


图2 Shukry 弯道水位和流速对比

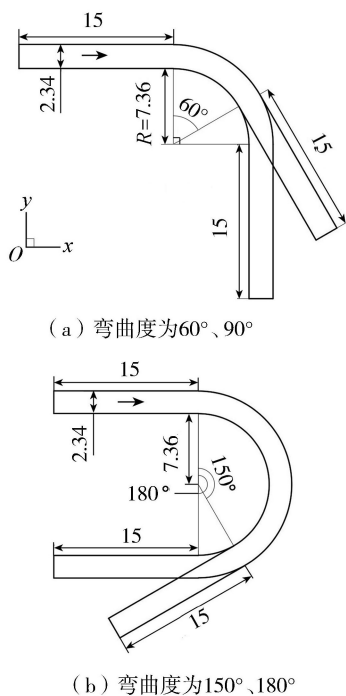


图3 各弯道模型平面示意图(单位:m)

模型设置为相同尺寸的 mass solid particles, 其直径为 0.05 m , 密度为 917 kg/m^3 , 与弯道边界接触后的恢复系数为 0.5 , 阻力系数乘数设为 1 (意味计算域采用球体粒子充填)。水槽糙率设为 0.015 , 静摩擦系数为 0.5 。粒子设为随水流运动, 经过验算确定粒子源生成粒子速率为 200 个/秒。粒子和流体相互作用采用双向动量耦合, 并采用控制变量法将无冰颗粒的清水流作为对照试验。

4 结果与分析

冰的密度小于水, 主要分布于水体表层, 对水流表层的水力特性影响较大, 故以下主要从流凌分布、水面速度、横向环流、水位及湍动能变化几个方面探究流凌对弯道水流的影响。

4.1 弯道流凌分布

流凌在不同弯道输移特点如图 4 所示。由图 4 可见, 弯曲度不同的各弯道, 在达到稳定状态后, 流凌在进口段及进入弯道初期 (进口断面) 的分布情况与直道分布相似。过弯道时, 流凌前缘沿水流主轴线不断向前发展, 随着粒子的集聚, 逐渐向凹岸聚集, 呈现凹岸多, 凸岸少的特点, 并沿凹岸输出弯道。出弯后流凌沿水流中心线左右摆动, 随下游控制水位的影响, 逐渐向两岸集聚。

另外, 各弯道流凌沿凹岸逐渐增多扩散, 流凌分布多呈现楔形分布, 这与李淑祎等^[23]在试验中的结论基本一致, 因模拟无法对粒间相互作用力进行描述, 该分布主要是流凌与槽间作用及弯道环流的影响所导致。各弯道速度较大流凌近凸岸, 且随着弯曲度的增大, 其范围逐渐缩小, 高流速流凌数量沿弯道断面依次递减。流凌在凹岸的聚集, 也解释了冰塞现象易集中停滞在弯道处, 尤其在凹岸及回水区低流速区。

4.2 弯道流速及横向环流

4.2.1 弯道流速

不同弯道冰水流和清水流表面流速等值线如图 5 所示。

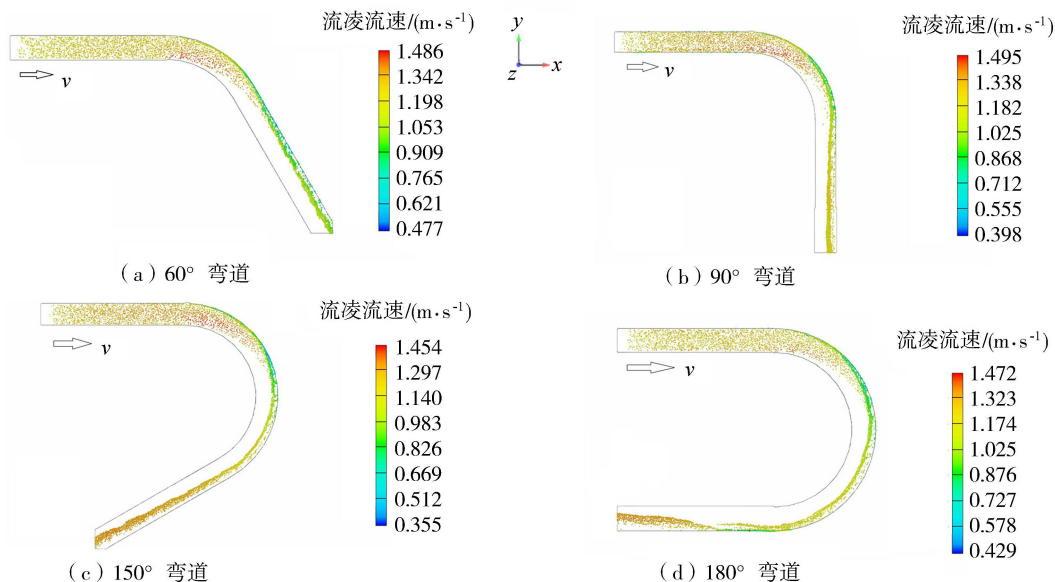


图4 不同弯曲度弯道流凌输移及分布

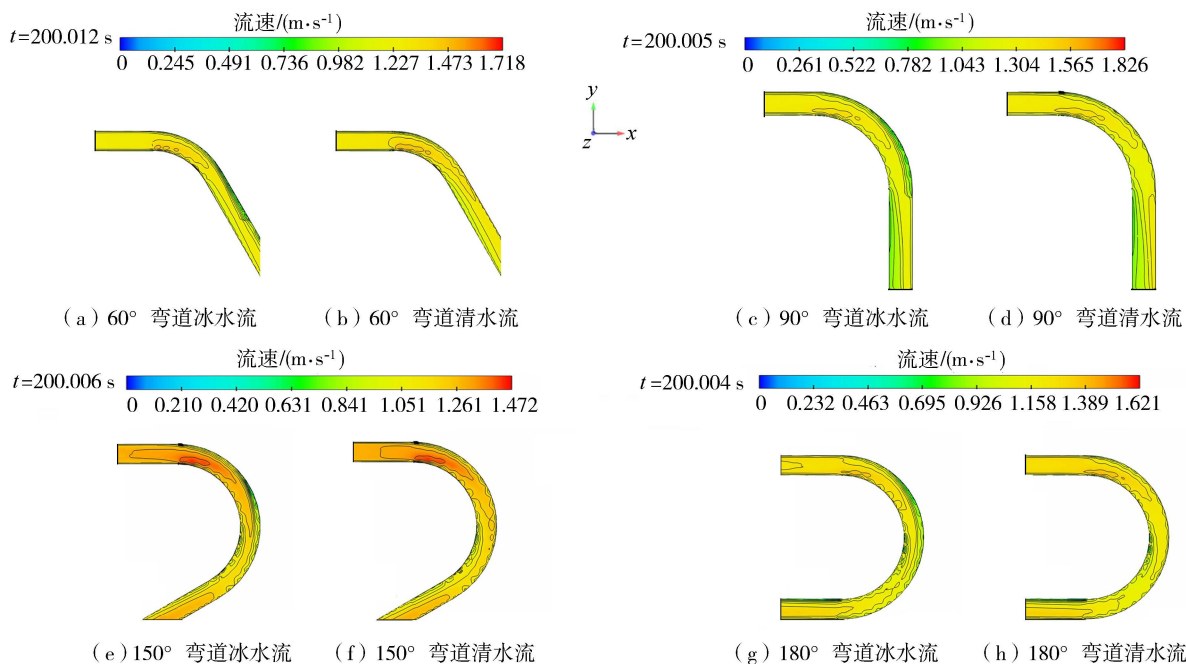


图5 各弯道表面流速分布等值线

对于清水流,各弯道均在入口凸岸产生高流速区,出口凸岸产生低速区,这与 Shukry 弯道水槽试验规律基本一致。随着弯曲度的增大,主流越早偏向凸岸,弯道出口断面主流区向凹岸偏移程度随着弯曲度的增大不断加大^[24]。

冰水流表面流速基本规律与清水流基本一致,主要不同在凹岸流态及主流区的改变。流凌在凹岸形成长条状低流速区,且沿水流该区域逐渐变宽。由上述冰凌运移规律可知,此处为流凌聚集处,聚集的流凌对凹岸流态产生了很大影响。随着弯曲度的加大,低流速区发展越广泛,冰花堆积越多。冰水流的主流亦因凹岸冰花的堵塞,向凸岸偏移程度变大,缩小主流过流面积。随上游流凌的不断堆积发展,

此处极易形成冰塞体,并逐渐向上游递进,为河段险工部位。综上所述,由于流凌与水槽作用及弯道环流的存在,冰水流流速发展不充分,导致冰水流与清水流流速分布出现差异。

对各弯道冰水流及清水流流速进行定量分析,依据弯曲度的不同,对进口、弯顶、出口 3 个典型断面沿凹岸到凸岸水面流速分布进行分析。

如图 6 所示,60°弯道冰水流及清水流表面流速最大值均为 $v_{\text{顶}} > v_{\text{进}} > v_{\text{出}}$,出口断面冰水流速最小值小于清水流。90°弯道冰水流及清水流表面流速最大值均为 $v_{\text{进}} > v_{\text{顶}} > v_{\text{出}}$,进口断面两类流动相似,出口断面冰水流速最小值小于清水流,两类流动凹岸向凸岸流速变化剧烈。150°弯道冰水流及清水流表面

— 冰水流进口断面 — 清水流弯顶断面
 — 清水流进口断面 — 冰水流出口断面
 — 冰水流弯顶断面 — 清水流出口断面

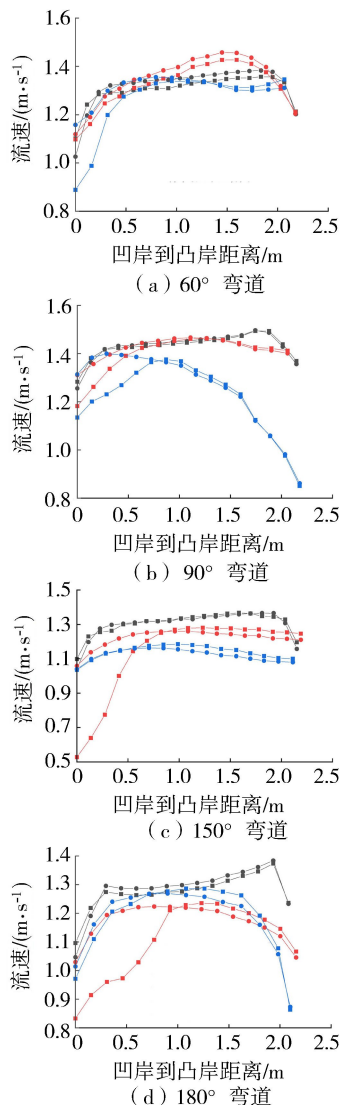


图6 各弯道典型断面水面流速沿槽宽分布

流速最大值 $v_{\text{进}} > v_{\text{顶}} > v_{\text{出}}$, 进口及出口断面两类流动速度相似, 弯顶断面凹岸速度差异大, 冰水流的速度更小。180°弯道进口及出口断面, 两类流动表面流速分布基本一致, 流速最大值 $v_{\text{进}} > v_{\text{出}} > v_{\text{顶}}$, 凹岸向凸岸方向, 弯顶断面冰水流速最小值小于清水流。综上可知, 两类流动进口断面流速基本相等, 弯顶及出口断面流速变化强烈。各弯道最大进口流速均大于出口流速, 主要是凹岸流速发生变化。60°和90°弯道冰水流和清水流进口与弯顶断面水面流速基本一致, 主要体现在出口断面的不同, 150°和180°弯道冰水流与清水流进口与出口断面流速基本一致, 主要体现在弯顶断面流速的不同。这是由于随弯曲度增大, 凹岸低流速区离凸岸高流速区越远, 低流速集中区延后。随着弯曲度增大, 在弯顶断面, 冰水流沿凹岸到水流中心流速差呈增大趋势, 即冰水流在急弯河段弯顶部位, 其低流速区范围更广泛。

如表1所示, 除180°弯道, 随着弯曲度的增大, 冰水流与清水流弯顶断面凹岸流速最小值的差值呈增大趋势, 而出口断面凹岸流速最小值的差值呈减少趋势, 说明弯曲度对典型断面流速的影响逐渐由出口转向弯顶断面。

表1 不同弯道弯顶断面及出口断面凹岸流速变化 m/s

弯道	弯顶断面凹岸		流速差	出口断面凹岸		流速差
	流速最小值			流速最小值		
	冰水流	清水流		冰水流	清水流	
60°弯道	1.10	1.12	0.02	0.88	1.17	0.29
90°弯道	0.97	1.17	0.20	0.90	1.17	0.27
150°弯道	0.53	1.06	0.53	1.04	1.04	0
180°弯道	0.83	1.03	0.20	0.97	1.01	0.04

4.2.2 横向环流分布

为分析流凌条件下水流垂向分布特征, 对流凌发展充分且流速变化大的180°弯道的典型断面进行分析, 并与相同条件下清水流对比。不考虑纵向流速矢量, 180°冰水流和清水流速度矢量图如图7所示。可以发现, 在进口及出口断面, 两类流动横向环流速度矢量基本相似, 其中进口断面横向环流呈现自凹岸向凸岸变化的特征, 而出口断面产生相似的对称环流, 冰水流凹岸下有小环流。对弯顶断面分析可知, 有流凌覆盖的条件下, 凹岸形成愈加强烈的冰下环流, 与靠近凸岸的大环流是对称关系, 环流强度也小于后者。冰水流位于凸岸底部的大环流明显小于清水流, 可能是由于积聚的流凌影响水流过流能力, 在一定程度上影响凸岸的大环流的发展演化。

4.3 水位

为研究流凌对弯道水位的影响, 对弯顶断面横向水位进行分析, 由于离心力的存在而使自由水面的平衡状态遭到破坏, 进入弯段即有从凸岸到凹岸倾斜的横比降 J_r ^[25], 水深横向变化如图8和图9所示。各弯道凹岸到凸岸水位都有降低趋势, 水面超高依次为0.03 m (60°弯道)、0.04 m (90°弯道)、0.06 m (150°弯道) 和0.03 m (180°弯道), 说明弯曲度对宽浅明渠水深和水面超高有一定影响, 但不明显。弯顶断面冰水流水位比清水流高, 但随着弯曲度的增大两者差值变小。

4.4 弯道湍动能

湍动能作为水流运动过程中重要的参数, 是表征某点总紊动强弱的物理量^[26], 反映了水流脉动强度的大小。可表示为 $k = \frac{1}{2} (u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)$, u_x' 、 u_y' 、 u_z' 分别为纵向、横向和垂向脉动流速。待水流发展稳定后, 对湍动能进行分析, 湍动能的变化规律如图10所示。

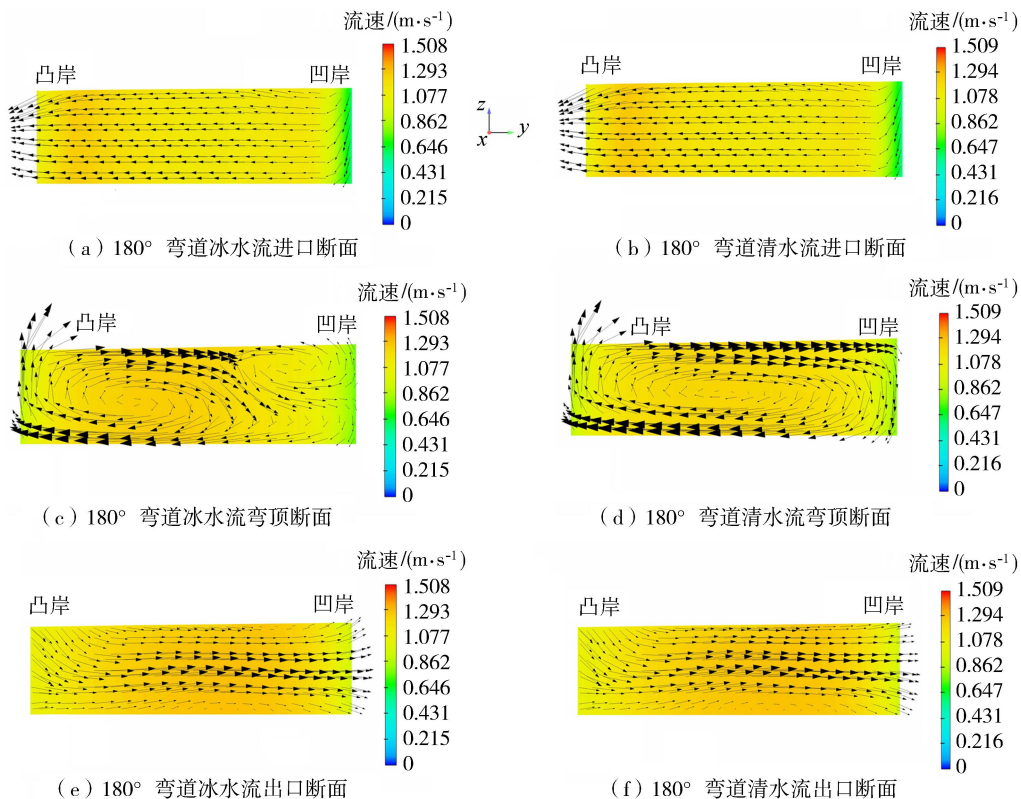


图 7 不同弯道冰水流与清水流各断面横向环流分布

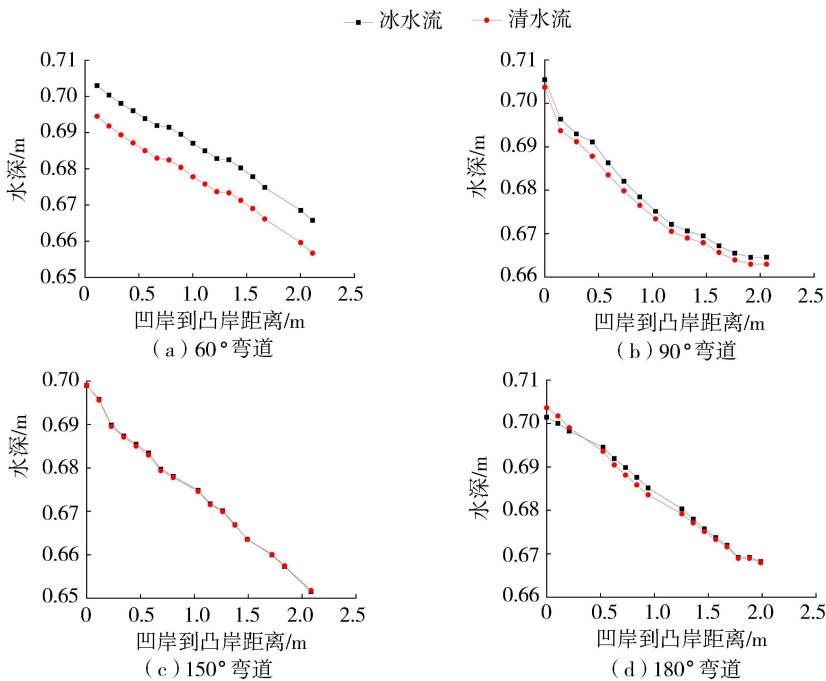


图 8 不同弯道弯顶断面冰水流与清水流水深变化对比

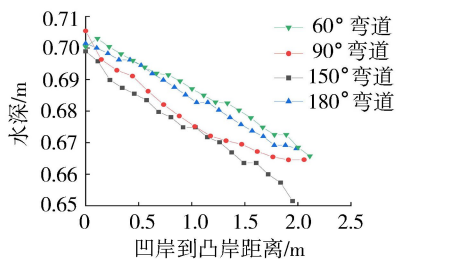


图 9 各弯道弯顶断面的水深变化

从图 10 中看出弯曲度为 60° 、 90° 、 150° 、 180° 的弯道,清水流和冰水流湍动强烈部位主要从弯道入口处发展,集中于近岸两侧。凹岸高端动能区冰水流比清水流宽,湍动较强,凸岸侧相似,凹岸向凸岸湍动能先减小后增大,呈 U 形分布。说明聚集的流凌冰在一定程度上增加了流体的湍动能,随弯曲度增大,湍动能呈增大趋势。

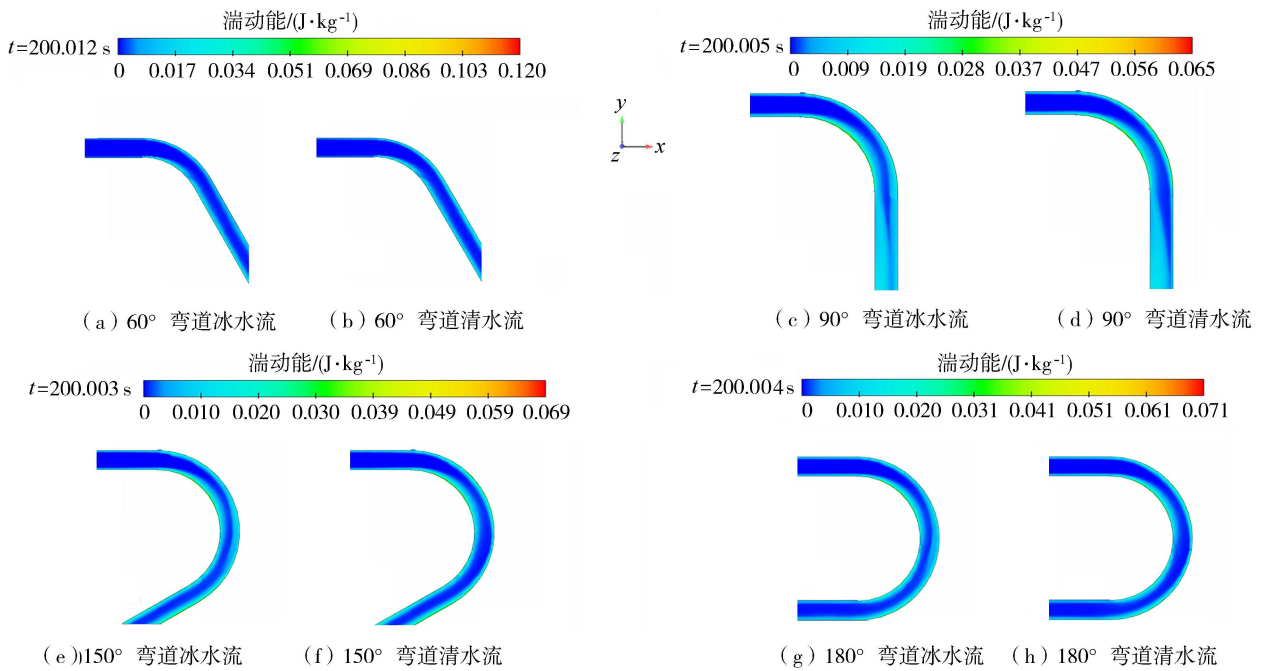


图 10 各弯道冰水流和清水流湍动能变化

5 结 论

a. 过弯道时,流凌前缘沿水流主轴线不断向前发展,随着流凌的集聚,流凌逐渐向凹岸聚集,呈现凸岸少、凹岸多的特点,并逐渐向凹岸集聚输出,弯道处流凌分布多呈现楔形分布。各弯道流速较大流凌颗粒近凸岸侧,且随着弯曲度的增大,其范围逐渐缩小,高流速流凌数量分布呈现沿弯道断面依次递减。

b. 各弯道最大进口流速均大于出口流速,随着弯曲度的增大,弯顶断面离凸岸高流速区越远,低流速集中区较为延后,冰水流沿凹岸到水流中心流速差呈增大趋势,即急弯河段弯顶部位滞冰区越典型、凹岸低流速区域越大。流凌的存在增大凹岸表层水流横向环流,在一定程度上影响凸岸底部大环流的发展。

c. 弯曲度对宽浅明渠水深和水面超高有一定影响,但不明显。弯顶断面水位冰水流比清水流高,但随着弯曲度的增大两者差值变小。冰水流与清水流相比,主要体现在凹岸湍动能变化,随弯曲度的增大凹岸湍动能呈增大趋势,说明聚集的流凌冰在一定程度上增加了流体的湍动能。

参考文献:

- [1] 可素娟. 黄河冰凌研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2002.
- [2] 茅泽育,吴剑疆,张磊,等. 天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 700-705. (MAO Zeyu, WU Jianjiang, ZHANG Lei, et al. Numerical simulation of river ice jam [J]. Advances in Water

- Science, 2003, 14(6): 700-705. (in Chinese))
- [3] 吴剑疆,茅泽育,王爱民,等. 河道中水内冰演变的数值计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(5): 702-705. (WU Jianjiang, MAO Zeyu, WANG Aimin, et al. Numerical simulation of frazil ice evolution in rivers [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(5): 702-705. (in Chinese))
- [4] 樊霖,茅泽育,齐文彪,等. 伊丹河输水河道封冻期冰情演变数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 14-18. (FAN Lin, MAO Zeyu, QI Wenbiao, et al. Numerical simulation of river-ice processes in a water-transfer river of Yidan River during freezing period [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 14-18. (in Chinese))
- [5] 王军,倪晋,张潮. 冰盖下冰花颗粒的随机运动模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 191-195. (WANG Jun, NI Jin, ZHANG Chao. Simulation of random movement of ice particles under ice cover [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2008, 31(2): 191-195. (in Chinese))
- [6] 李超,李畅游,李红芳. 黄河(内蒙古段)弯道卡冰过程及数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(10): 103-110. (LI Chao, LI Changyou, LI Hongfang. Study and simulation on ice jam process in river bends for Inner Mongolia reach of the Yellow River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(10): 103-110. (in Chinese))
- [7] SHEN H T. Mathematical modeling of river ice processes [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 62(2): 3-13.
- [8] 倪宝玉,刘晨辉,胡文进,等. 二维 Stokes 波与多块浮冰相互作用数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,

- 2019,34(2):141-148. (NI Baoyu, LIU Chenhui, HU Wenjin, et al. Numerical simulation on the interaction between two-dimensional Stokes wave and multiple ice floes[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019, 34(2):141-148. (in Chinese))
- [9] 金占军. 冰水两相流输水浮冰受力特性研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2016.
- [10] 冀鸿兰,卞雪军,徐晶. 黄河内蒙古段流凌预报可变模糊聚类循环迭代模型[J]. 水利水电科技进展,2013,33(4):14-17. (JI Honglan, BIAN Xuejun, XU Jing. Variable fuzzy clustering loop iteration model for ice-run forecast in Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4):14-17. (in Chinese))
- [11] 张莹. 颗粒两相流动的流场特性研究[D]. 太原:中北大学,2018.
- [12] 刘寒秋,刘爱华,范世东,等. 冰水两相流管道冲蚀磨损影响与防护[J]. 表面技术,2019,48(2):109-116. (LIU Hanqiu, LIU Aihua, FAN Shidong, et al. Erosion influence and protection of ice-water two phase flow pipe[J]. Surface Technology, 2019, 48(2):109-116. (in Chinese))
- [13] 邓义斌,王飞显,范世东. 管道冰水两相流动阻力特性的数值模拟[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(3):533-536. (DENG Yibin, WANG Feixian, FAN Shidong. Numerical simulation of resistance characteristics of ice-water two-phase flow in pipes[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation & Engineering), 2015, 39(3):533-536. (in Chinese))
- [14] 王晓玲,蒋志勇,周莎莎,等. 转弯半径对引水式水电站弯道排冰影响的数值模拟[J]. 工程力学,2011,28(2):152-158. (WANG Xiaoling, JIANG Zhiyong, ZHOU Shasha, et al. Numerical simulation of effect of turning radius on ice removal in bend channel of diversion type power house[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2):152-158. (in Chinese))
- [15] 姜坤. 冰期弯道河冰运动特性数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
- [16] 吴新宇,李志威,胡旭跃,等. 弯曲河流颈口裁弯不同阶段水流运动特性[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):21-27. (WU Xinyu, LI Zhiwei, HU Xuyue, et al. Hydrodynamic characteristics of neck cutoff process of different stages in a meandering river[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):21-27. (in Chinese))
- [17] RAN Danjie, WANG Wene, HU Xiaotao. Three-dimensional numerical simulation of flow in trapezoidal cutthroat flumes based on FLOW-3D[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2018, 5(2):168-176.
- [18] Flow Science Inc. FLOW-3D User Manual V11.2[M]. Santa Fe: Flow Science Inc., 2016.
- [19] HIRT C W. Particle-fluid coupling, technical note FSI-99-TN50[R]. Santa Fe: Flow Science Inc., 1999.
- [20] BARKHUDAROV M, DITTER J L. Particle transport and diffusion, technical note FSI-94-TN39[R]. Santa Fe: Flow Science Inc., 1994.
- [21] SHUKRY A. Flow around bends in an open flume[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1950, 115(1):751-779.
- [22] 周建银. 弯曲河道水流结构及河道演变模拟方法的改进和应用[D]. 北京:清华大学,2015.
- [23] 李淑伟,陈胖胖,汪涛,等. 弯槽冰塞水位试验研究[J]. 人民黄河,2017,39(11):89-94. (LI Shuzheng, CHEN Pangpang, WANG Tao, et al. Experimental study on ice jam stage in a curved channel[J]. Yellow River, 2017, 39(11):89-94. (in Chinese))
- [24] 马森,李国栋,张巧玲,等. 弯道弯曲度对水流结构的影响[J]. 应用基础与工程科学学报,2016,24(6):1193-1202. (MA Miao, LI Guodong, ZHANG Qiaoling, et al. Effects of curve bending on the flow structure[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6):1193-1202. (in Chinese))
- [25] 张红武,吕昕. 弯道水力学[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
- [26] 王虹,王连接,邵学军,等. 连续弯道水流紊动特性试验研究[J]. 力学学报,2013,45(4):525-533. (WANG Hong, WANG Lianjie, SHAO Xuejun, et al. Turbulence characteristics in consecutive bends[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(4):525-533. (in Chinese))

(收稿日期:2020-03-31 编辑:郑孝宇)

