

文章编号: 1000-0240(2009)04-0705-06

冰盖下水流速度分布的二维数值模拟分析

王军¹, 付辉², 伊明昆³, 孙晓艳¹, 陈胖胖¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
3. 安徽省水利水电勘测设计院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 基于标准的 $k-\epsilon$ 模型, 利用有限体积法, 对冰盖下水流速度分布进行了二维数值模拟和分析。结果表明: 当冰盖和河床糙率比值变化时, 水流速度剖面发生变化; 冰盖下的最大流速值比速度对称分布时要大, 且偏于光滑的一边; 在相对光滑壁处近壁流速值大于相应对称分布时的流速值, 该结果与实验室实测速度剖面情况吻合。数值试验表明, 最大流速点位置的偏移量仅在有限的范围内, 冰盖区、床面区及冰盖下水流平均速度相差较小, 表明了工程应用中假定各区流速相等是可行的。

关键词: 冰盖; 水流速度分布; 粗糙度; 偏移; 数值模拟

中图分类号: P334⁺.92 **文献标识码:** A

0 引言

高纬度地区河流冬季常形成坚冰盖, 冰盖的出现使河流的热力条件、水力条件以及几何边界条件都发生变化, 湿周增加导致水流阻力增加, 使上游水位可能产生较大幅度的壅高, 常引发上游或下游产生凌洪灾害。在输沙河流上, 冰盖的出现形成了冬季特点的输沙和河床演变现象^[1-2]。因为问题的重要性, 国内外学者做了大量卓有成效的研究工作^[3-8]。因研究的需要, 冰塞下的水流速度分布一直为相关学者所关注^[9-11], Tatinclaux 等^[12]研究表明, 冰盖下流速分布随冰盖和槽底糙率不同的比值而变化, 最大流速点的位置将偏向于较为光滑的一边; 当冰盖糙率和槽底糙率相等时, 最大流速点位置位于冰盖下 1/2 处的水深。实际的河流中, 冰盖糙率和床面糙率相等的时间和机会极少, 大多数水流运动处于不对称的状况^[13-14]。冬季冰盖或其下面的冰塞堆积体常常变化剧烈且复杂, 虽然从定性角度已知最大流速点位置将偏于相对较为光滑的一边, 但其偏移的规律及速度分布的变化从目前少量的测试数据似尚未得到有效的总结, 受限于实验室条件, 不能精细模拟和测量冰盖下水流速度分布随

冰盖糙率和床面糙率相对变化而变化的规律。因此, 基于标准的 $k-\epsilon$ 模型, 利用有限体积法, 对冰盖下水流速度分布进行了二维数值模拟计算, 同时与试验数据进行了对比分析。

1 数值模拟的基本方程

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_j v_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \Delta \rho g_i \quad (2)$$

柯莫哥洛夫-普朗特表达式:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

收稿日期: 2008-10-26; 修订日期: 2009-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372028); 合肥工业大学校博士基金项目(200804178871)资助

作者简介: 王军(1962-), 男, 安徽天长人, 教授, 1984年毕业于合肥工业大学, 现主要从事河冰水力学研究。

E-mail: Jun_wanghfut@126.com

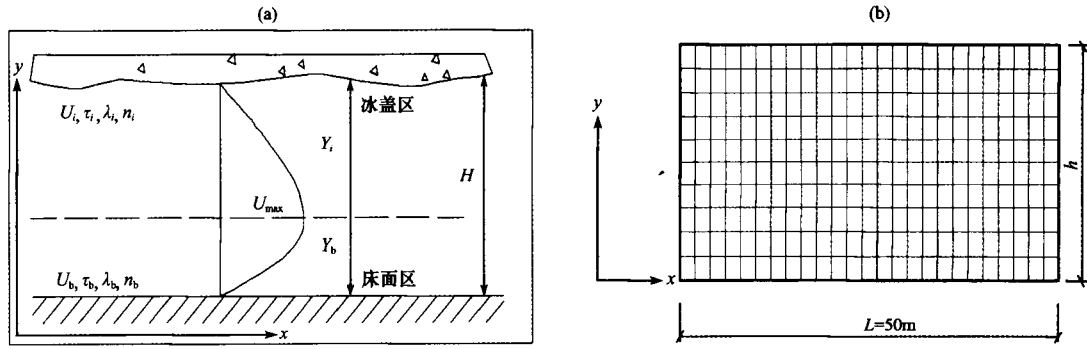


图 1 冰盖下水流速度分布和网格划分示意图

Fig. 1 A sketch showing the velocity distribution under ice cover and grid allocation

式中:

$$\tau_{ji} = \mu_\epsilon \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

模型中各通用常数按经验选取:

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \\ \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.33$$

和明流相比,在动量方程源项中,不仅有床面的剪切力,还有冰盖底面的剪切力。

2 模型的离散和求解

将方程变形,合并对流项和扩散项,其它有关项并入源项。图 1 是计算采用的计算域和坐标系示意图,取笛卡尔坐标系,网格划分采用四边形。用有限体积法离散连续性方程、动量方程、 $k-\epsilon$ 方程等,在近壁面处采用壁面定律并修改其粗糙度以考虑边壁糙率的影响,采用 Simple 算法。

3 计算的边界条件

入口边界条件:给定水流平均速度 v ,湍动能和耗散率分别由下式确定:

$$k = \frac{3}{2} (v T_i)^2, \epsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / l \quad (7)$$

式中: T_i 为湍流强度; l 为特性尺度。

出口边界条件: $k-\epsilon$ 按照坐标局部单向化方式处理; u 速度按照局部质量守恒; v 速度按照齐次 Neumann 条件处理。

壁面:采用壁面函数法^[15],无量纲的速度分布服从对数分布律:

$$\frac{u}{v^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y v^*}{\nu} \right) + B \quad (8)$$

式中: $v^* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ 为摩阻流速; κ 为 Karman 常数,取 0.4; B 是与表面粗糙度有关的常数。

4 基本模拟和校验

为检验模拟的可靠性,首先与实验室实测数据进行了模拟对比。在图 2(a)和图 2(b)中,河床表面由 $d_{50} = 0.35$ mm 的沙铺成,冰盖糙率 n_i 分别为 0.0322 和 0.0347,水深 h 分别为 0.15 m 和 0.225 m。由图 2 可见,其基本定性趋势及定量变化基本

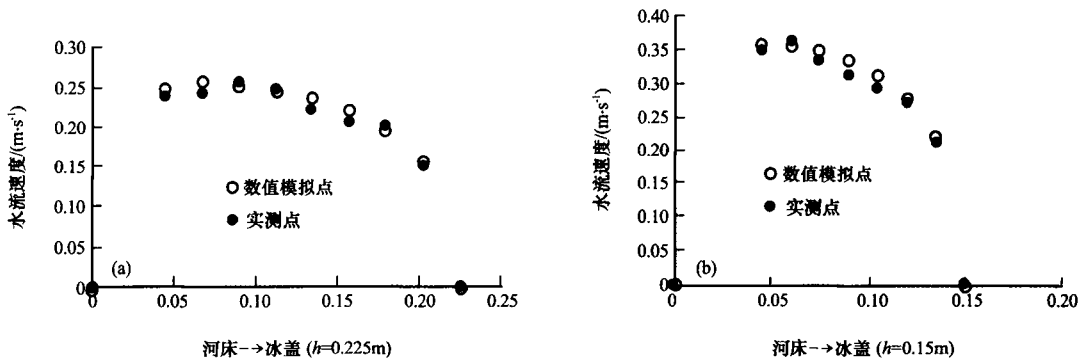


图 2 实测点和数值模拟点水流速度对比

Fig. 2 The measured and simulated velocity profiles for $h=0.15$ m and 0.225 m

吻合。

5 冰盖糙率变化对水流速分布的影响模拟

图 3 是水深 $h=1\text{ m}$ ，入口边界平均水流速度为 $v=1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下，改变冰盖粗糙度的模拟计算结果，图中 Δ_i 、 Δ_b 分别表示冰盖底面和床面的粗糙高度。图 3 说明，当冰盖糙率增加时，水流速度分布轮廓偏离对称分布时的情况，因为冰盖边界较床面边界粗糙，所以最大流速点偏向床面。此外，由图亦可看出，在冰盖边界和床面边界粗糙程度不同时，最大流速值也大于流速对称分布时的情况，随两边界粗糙度增大，近光滑边界水流速度分布均匀程度增加。图 4 是由 Hains 等^[16] 实验室实测数据绘制而成，分析该图可以发现其速度分布与模拟的结论是一致的。此外，分析可知冰盖糙率增加时，相对冰盖糙率较小时的情况，近床面区域水流速度会相应调整和增大，由此可以导致与文献

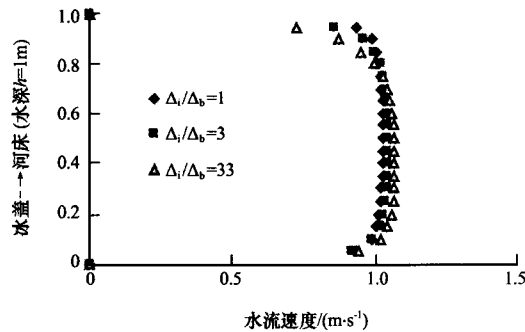


图 3 不同冰盖粗糙度流速分布对比
Fig. 3 The velocity profiles for different roughness of ice cover

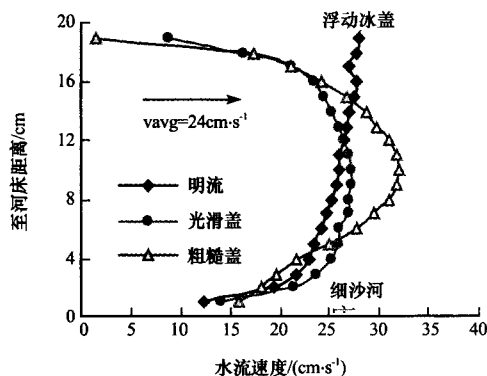


图 4 实验室实测流速分布^[16]
Fig. 4 Vertical velocity profiles: Open water compared to smooth and rough ice cover cases, from Reference^[16]

[14]相吻合的结论，即床面散粒体泥沙更易起动。

图 5 是冰盖和床面粗糙度对换时水流速度分布模拟图，由图可见，其水流速度分布变化几乎是对称的，说明在研究上下边界粗糙度变化时，只需要研究其中一个边界粗糙度相对于另一边界粗糙度变化情况就可以了，两种情况下的定性变化规律是一致的。

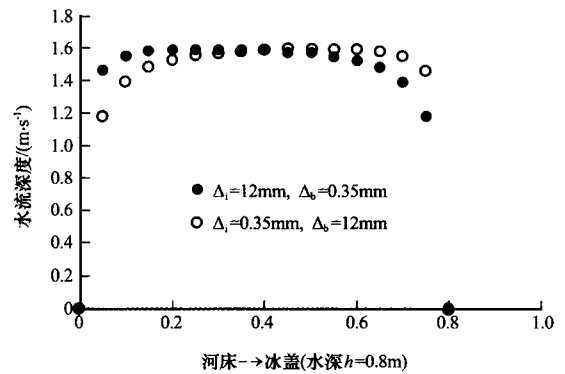


图 5 上下边界粗糙度对换时速度分布
Fig. 5 The velocity profiles with alternation of roughness on bed and cover

6 最大流速点的偏移范围

数值试验模拟发现在 Δ_i/Δ_b 达到一定比值(该值与水深和速度有关，本计算范围内大约为 10~100)后，再增大冰盖的粗糙度，水流速度分布已很难变化。说明在一定的范围内，当冰盖的粗糙度增大到一定值后，水流速度分布趋于某一种极限变化情况，即糙率的改变对最大流速点偏移位置的影响是受到限制的。当然，壁面粗糙高度不可能允许无休止的增大，否则，断面条件将发生质的变化。

图 6 是冰盖糙率增加而床面糙率维持不变时，由数值试验分析发现的最大流速点下移变化规律。由图中可以看出，在一定的范围内，最大流速点下移的幅度大约不超过水深的 20%，也即最大流速点下移范围有限，这可能也是冰盖下水流研究或计算时，所做的一些简化假定(即分区流速相等且等于断面平均流速)能够在实际中得以应用的原因之一^[17]。图 7 是不同水流条件下改变冰盖糙率所得出的最大流速点位置下移幅度变化趋势，其中 h_{max} 对应流速最大值的位置， h 是冰盖下的水深，该图所反映的总体趋势是 $(\Delta_i - \Delta_b)/h$ 增大到一定程度之后，最大流速点位置渐趋于某一定值。

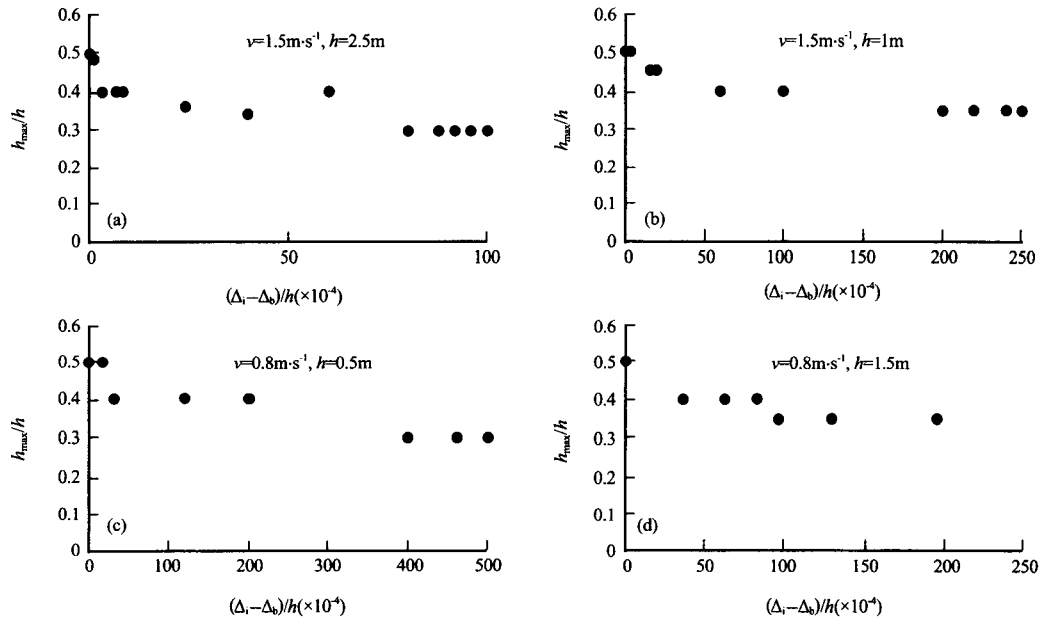


图 6 最大流速点位置随冰盖粗糙度增加移向床面变化趋势

Fig. 6 The maximum velocity location changing with for different v and h

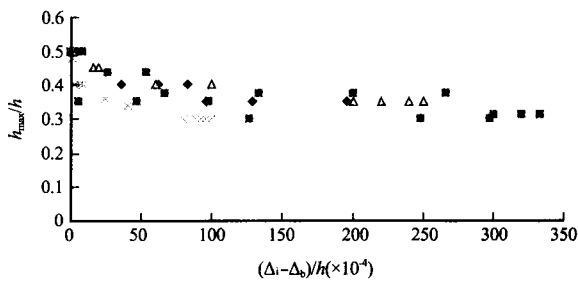


图 7 h_{max}/h 和 $(\Delta_i - \Delta_b)/h$ 变化关系

Fig. 7 Relation between h_{max}/h and $(\Delta_i - \Delta_b)/h$

相比较而言, 床面越光滑, 最大流速点的位置越容易偏向光滑边, 也就是说, 如果床面具有一定的粗糙度, 最大流速点位置的下移幅度相对变小。

表 1 冰盖粗糙度变化时, 两种床面粗糙度的最大流速点位置偏移对比

Table 1 The excursion of the maximum velocity location with two bed roughness when ice cover roughness changed

Δ_i/m	距水深中点的下移相对距离/%		备注
	$\Delta_b=0$	$\Delta_b=0.005$	
0.01	12.5	2.5	$h=4\text{ m}$ $v=1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
0.03	15	2.5	
0.05	17.5	7.5	
0.09	17.5	7.5	

如表 1 所示。

表 2 是最大流速点位置及分区平均流速等数值模拟计算结果表, 由表可以清楚的看出两点: 最大流速点下移的位置有限; 分区平均流速相互之间以及和总平均流速的差别较小. 一些学者研究认为^[5, 7, 18-19]分区平均流速之间相差较小, 一般不会超过 10%, 数值模拟的结果证明了其结论的正确性。

7 结论

当冰盖和河床糙率比值变化时, 水流速度剖面发生变化, 最大流速点的位置将偏于光滑的一边, 无论是国内外实验还是数值模拟都证明了这一点. 通过模拟发现, 和速度对称分布时的情况相比, 上下边界的粗糙度不同时, 最大流速值相对要大, 但最大流速点的位置仅在一定范围内偏移, 和光滑床面相比, 对于具有一定粗糙度的床面, 冰盖粗糙度增加时, 最大流速点位置的下移难度增加. 对于冰盖下的速度分布问题一直存在一些分歧, 一些学者认为分区流速不相等; 一些学者认为分区流速相等且等于冰盖下的断面平均流速的假定是正确的, 理由是该假定在工程实际中得到了应用. 但现有的两方面结论大多来自于原型观测和实验室中的实测数据. 文献[17]从理论上证明了分区流速相等且等于

表 2 分区平均流速及断面平均流速的比较

Table 2 The average velocities and average cross-section velocities for different areas

水深 h/m	V_1 $/(m \cdot s^{-1})$	Δ_b $/m$	Δ_i $/m$	最大流速		V_2 $/(m \cdot s^{-1})$	V_3 $/(m \cdot s^{-1})$	$(V_2 - V_1)$ $/V_1$	$(V_3 - V_1)$ $/V_1$	$(V_3 - V_2)$ $/V_3$	
				h_{max}/m	$V_{max}/(m \cdot s^{-1})$						
2	0.8	0	0.001	0.8	0.8264	0.8090	0.7940	1.1250	-0.7500	-1.8892	
			0.003	0.8	0.8330	0.8009	0.7994	0.1109	-0.0739	-0.1850	
			0.009	0.7	0.8423	0.8004	0.7998	0.0465	-0.0251	-0.0716	
			0.012	0.7	0.8455	0.8036	0.7981	0.4474	-0.2409	-0.6900	
			0.016	0.7	0.8490	0.8070	0.7962	0.8786	-0.4731	-1.3581	
			0.03	0.6	0.8588	0.8035	0.7985	0.4421	-0.1895	-0.6327	
			0.04	0.6	0.8641	0.8087	0.7963	1.0830	-0.4641	-1.5543	
			0.045	0.6	0.8664	0.8111	0.7953	1.3815	-0.5921	-1.9853	
			0.048	0.6	0.8677	0.8123	0.7947	1.5415	-0.6607	-2.2168	
			0.05	0.6	0.8686	0.8131	0.7944	1.6432	-0.7042	-2.3640	
			0.1	0.6	0.8686	0.8131	0.7944	1.6432	-0.7042	-2.3640	
			0.001	0.9	0.8431	0.8041	0.7966	0.5184	-0.4242	-0.9466	
			0.006	1	0.8482	0.8051	0.7949	0.6369	-0.6369	-1.2819	
			0.009	0.9	0.8518	0.8003	0.7997	0.0419	-0.0342	-0.0761	
			0.012	0.9	0.8546	0.8034	0.7972	0.4226	-0.3458	-0.7711	
0.024	0.8	0.8631	0.8020	0.7987	0.2528	-0.1685	-0.4221				
1.5	1.2	0.003	0.048	0.8	0.8747	0.8141	0.7906	1.7607	-1.1738	-2.9694	
			0.049	0.8	0.8751	0.8146	0.7903	1.8189	-1.2126	-3.0687	
			0.05	0.8	0.8755	0.8149	0.7901	1.8608	-1.2406	-3.1404	
			0.06	0.8	0.8755	0.8149	0.7901	1.8608	-1.2406	-3.1404	
			0.07	0.8	0.8755	0.8149	0.7901	1.8608	-1.2406	-3.1404	
			0.1	0.8	0.8755	0.8149	0.7901	1.8608	-1.2406	-3.1404	
			0.006	0.009	1	0.8560	0.8037	0.7963	0.4607	-0.4607	-0.9256
			0.012	0.675	1.3096	1.2085	1.1931	0.7066	-0.5782	-1.2923	
			0.024	0.6	1.3254	1.2075	1.1950	0.6266	-0.4177	-1.0487	
			0.036	0.6	1.3370	1.2202	1.1866	1.6801	-1.1200	-2.8318	
			0.037	0.6	1.3379	1.2210	1.1860	1.7460	-1.1640	-2.9443	
			0.038	0.6	1.3383	1.2215	1.1857	1.7891	-1.1927	-3.0178	
			0.04	0.6	1.3383	1.2215	1.1857	1.7891	-1.1927	-3.0178	
			0.048	0.6	1.3383	1.2215	1.1857	1.7891	-1.1927	-3.0178	
			0.06	0.6	1.3383	1.2215	1.1857	1.7891	-1.1927	-3.0178	
0.09	0.6	1.3383	1.2215	1.1857	1.7891	-1.1927	-3.0178				
0.16	0.6	1.3383	1.2215	1.1857	1.7891	-1.1927	-3.0178				

注： Δ_i 、 Δ_b 分别表示冰盖底面和床面的粗糙高度； h_{max} 对应流速最大值的位置； h 是冰盖下的水深； V_{max} 为最大流速； V_1 为断面平均流速； V_2 为床面区平均流速； V_3 为冰盖区平均流速。

断面平均流速是难以成立的，但由数值模拟分析和计算的结果表明，分区流速和断面平均流速的差异较小，这解释了工程应用中将分区流速和断面平均

流速相互之间视为相等是可行的。

参考文献 (References):

[1] Milburn D, Prowse T D. The effect of river-ice breakup on

- suspended sediment and select trace-element fluxes[J]. *Nordic Hydrology*, 1996, **27**(1-2):69-84.
- [2] Moore J N, Landrigan E M. Mobilization of metal-contaminated sediment by ice jam floods [J]. *Environmental Geology*, 1999, **37**(1-2):96-101.
- [3] Hains D, Zabilansky L J, R N Weisman. An experimental study of ice effects on scour at bridge piers[C]//Cold Regions Engineering and Construction Conference and Expo. Edmonton: Alberta, 2004: 16-19.
- [4] Yang Kailin. Simulation of ice jam in river channels[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2002, **33**(10):40-47. [杨开林. 河道冰塞的模拟[J]. *水利水电技术*, 2002, **33**(10):40-47.]
- [5] Mao Zeyu, Wu Jianjiang, Zhang Lei, *et al.* Numerical simulation of river ice jam [J]. *Advances in Water Science*, 2003, **14**(6):700-705. [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.]
- [6] Li Zhijun, Li Guangwei, Shen Zhaowei, *et al.* The physical property and elastic modulus of the DUT-1 model ice[J]. *Progress in Natural Science*, 2000, **10**(10):931-935. [李志军, 李广伟, 沈照伟, 等. DUT-1 模型冰的物理性能和弹性模量[J]. *自然科学进展*, 2000, **10**(10):931-935.]
- [7] Wei Liangyan. Flow resistance in ice-covered river [J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 2002, **2**:1-9. [魏良琰, 封冻河流阻力研究现状[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2002, **2**:1-9.]
- [8] Jin Guohou, Gao Peisheng, Lu Bingxiu. Ice regime forecast model in open channel [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(10):1-9. [靳国厚, 高霁生, 吕斌秀. 明渠冰情预报的数学模型[J]. *水利学报*, 1997(10):1-9.]
- [9] Shen Hungtao, Yapa, Poojitha D. Flow resistance of river ice cover[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, **112**(2):173-183.
- [10] Teal M J, Ettema R, Walker J F. Estimation of mean flow velocity in ice-covered channels [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, **120**(12):1385-1400.
- [11] Wang Dapei, McCurry P, Bourdages R. Application of flow velocity distribution models to channel discharge measurements [C]// Hotchkiss R H, Glade M. *The Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management*. Minneapolis, Minnesota, USA, 2000, doi: 10.1061/40517(2000)313.
- [12] Tatinclaux J C, Mustafa G M. Asymmetric plane flow with application to ice jams [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, **103**(11):185-210.
- [13] Wang Jun, Sun Lianjin, Zhou Zhihui. Stability of floes under ice jams [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1999(2):165-170. [王军, 孙连进, 周智慧. 冰塞下冰块起动分析[J]. *水力水运科学研究*, 1999(2):165-170.]
- [14] Wang Jun, Sun Lianjin. A laboratory study of starting velocity of noncohesive sediment under ice cover [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1998(2):64-169. [王军, 孙连进. 冰盖下散粒体泥沙起动流速的试验研究[J]. *水力水运科学研究*, 1998(2):64-169.]
- [15] Tao Wenquan. *Numerical Heat Transfer (Second Edition)* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001:353-357. [陶文铨. *数值传热学(第2版)* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001:353-357.]
- [16] Hains D, Zabilansky L. Laboratory test of scour under ice: data and preliminary results[R]. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, U. S. Army Corps of Engineers, Report number ERDC/CRREL TR-04-9, 2004: 1-182.
- [17] Wang Jun. Discussion of velocity distribution and resistance under ice cover[J]. *Advances In Water Science*, 2005, **16**(1):28-31. [王军. 封冻河道下流速分布和阻力问题探讨[J]. *水科学进展*, 2005, **16**(1):28-31.]
- [18] Chee, S P, Haggag M R I. Instability characteristics of ice blocks[C]//Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, Vol. 2. Lulea, Sweden, 1978, **2**:373-387.
- [19] Larsen Peter A. Hydraulic roughness of ice covers [J]. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 1973, **99**(1):111-119.

The Simulation of Flow Velocity Profile under Ice Cover

WANG Jun¹, FU Hui², YI Ming-kun³, SUN Xiao-yan¹, CHEN Pang-pang¹

(Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei Anhui 230022, China)

Abstract: A model is used to simulate the velocity profile under ice cover based on finite volume method. The results indicate that velocity profile varies with the ratio of roughness of ice cover and bed. When the roughness of ice cover and bed are not equal, the maximum velocity becomes large and moves to the less rough side. However, the

range of maximum velocity moving is in a limited distance only. The difference of average velocities in ice-covered area, bed-affected area and under-ice area is on the small side, showing the feasibility of assuming that the velocities in all areas are the same.

Key words: ice cover; velocity profile; roughness; offset; numerical simulation