

生物附着现象对有压输水工程过流能力的影响

张健建¹, 张社荣¹, 刘 涵^{1,2}, 王 超¹, 王枭华¹, 姜佩奇^{1,3}, 崔 激¹

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 3. 水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 针对我国输水工程中生物污损现象造成的壁面混凝土剥落、有效过水断面缩小以及水质恶化等问题, 依托南水北调中线某输水建筑物, 开展了不同面积占比下的室内模型试验, 并采用多孔介质域数值仿真分析了以淡水壳菜为主的生物附着下的有压管道三维流场和淡水壳菜附着对有压输水工程过流能力的影响。结果表明: 受淡水壳菜附着的影响, 有压管道水流呈主流偏移现象, 近壁面水流质点动量交换更加剧烈; 断面糙率与附着厚度及面积占比均呈正相关关系, 低密度时, 影响因素主要为淡水壳菜附着数目, 高密度时, 附着厚度为主要因素。

关键词: 有压输水工程; 淡水壳菜; 糙率影响; 多孔介质仿真

中图分类号: TV672

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)01-0023-06

Effect of fouling organism attachment on flow capacity of pressurized water diversion system//ZHANG Jianjian¹, ZHANG Sherong¹, LIU Han^{1,2}, WANG Chao¹, WANG Xiaohua¹, JIANG Peiqi^{1,3}, CUI Wei¹ (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China; 3. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: Aiming at the adverse effects of wall concrete spalling, effective cross section reduction and water quality deterioration due to the phenomenon of biological fouling occurring frequently in Chinese water diversion projects, based on water diversion project in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project, laboratory model experiments were carried out under different area ratios, and porous media domain was used to simulate the three-dimensional flow field of a pressurized pipeline under biological attachment dominated by limnoperna fortunei. The influence of limnoperna fortunei attachment on the flow capacity of the pressurized pipeline was analyzed. The results show that the flow in the pressurized pipe presents the main flow deviation, and the particle momentum exchange near the wall is more intense. Section roughness was positively correlated with the attachment thickness and the area ratio. At low density, the main influencing factor was the attachment number of limnoperna fortunei. At high density, adhesion thickness is the main factor.

Key words: pressurized water diversion project; limnoperna fortunei; roughness effects; porous media simulation

随着长距离引水工程运行年限的增长, 工程运行过程中的新问题如淡水壳菜等生物污损现象不断凸显。调研发现, 在某输水结构壁面上以淡水壳菜为主的污损生物最大附着厚度达 15 mm, 侧壁单位面积最大密度近 7 万个, 致使混凝土发生大面积霉变和表观缺陷。附着在输水建筑物表面的生物会增加壁面粗糙度, 从而导致壁面阻力增加, 引发流态改变、过流能力减小以及运行水位超限等一系列问题^[1-3]。输水建筑物在淡水壳菜繁殖条件下的糙率可从 0.0164 增长至 0.0180, 造成沿程水头损失增大^[4-5]。这些问题已成为制约工程长期运行安全、加

剧潜在工程运行安全风险的关键要素。

针对上述问题, 已有学者对生物附着现象对水流水力特性的影响进行大量研究。Dong 等^[6]通过多孔介质模拟贻贝串模型, 用雷诺平均的纳维斯托克斯 (RANS) 方程来模拟贻贝场周围的流场, 综合分析贻贝的密度和斜流之间的关系, 并对贻贝串在不同水深下的水动力特性进行了数值研究分析。Constantinescu 等^[7]利用试验和数值技术分析了固定在平板通道上的潜贻贝群周围的床层摩擦速度分布。O'donncha 等^[8]分析了有贻贝类生物附着的养殖棚和潮汐能装置对流体动力学的影响。Lin 等^[9]

基金项目: 天津市自然科学基金 (21JCYBJC00410)

作者简介: 张健建 (1991—), 男, 硕士, 主要从事水利工程运维安全研究。E-mail: 3071581307@qq.com

通信作者: 王枭华 (1992—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事水利工程运维安全研究。E-mail: tjdamwxh@163.com

观察了悬浮贻贝养殖场对潮流的水动力影响,表明悬浮贻贝串引起的表面摩擦远大于海床摩擦。Kervella 等^[10]在试验和数值模拟的基础上,描述了河道牡蛎群周围整体水流结构周围边界层的不对称发展。Andrewartha 等^[11]对生物附着的明渠进行阻力测量和近距离摄影测量表面特征研究,发现生物表面的有效粗糙度大于物理粗糙度。张海玲等^[12]对粗糙壁面的明渠进行试验研究,结果表明明渠壁面结构特征造成了水流阻力组成成分改变。槐文信等^[13-15]以淹没柔性植被为粗糙因素对淹没柔性植被覆盖的明渠进行研究,得出植被上部水流的纵向流速分布符合对数律的结论。

本文针对我国输水工程中生物污损现象造成的壁面混凝土剥落、有效过水断面缩小以及水质恶化等问题,依托南水北调中线某输水建筑物开展室内模型试验,并采用多孔介质域数值仿真淡水壳菜附着对有压输水工程过流能力的影响。

1 物理模型仿真原理

1.1 室内模型及加糙方法

室内模型采用内径为 600 mm 的预制管拼装,管道总长 14 m。前池、后池均采用钢板制作,尺寸为 3 m×3 m×1.5 m,每根管道进口安装矩形闸门;前池与后池之间设置 1 根回流管,直径为 200 mm^[16],如图 1 所示。

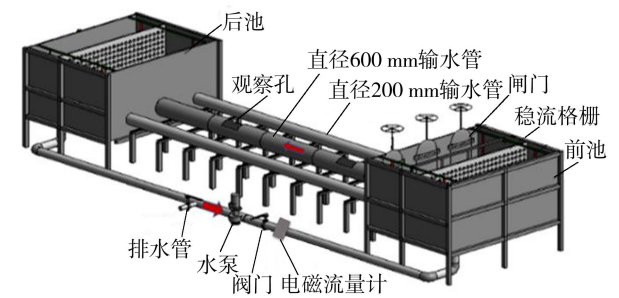


图 1 室内模型结构

根据前期调研结果,在有压输水工程中淡水壳菜在内壁四周均有分布,并且沿程分布较为均匀。为真实模拟淡水壳菜附着于建筑物的特性,试验选用淡水壳壳体分散粘于管道内壁上,模型各部位均匀粘贴。根据淡水壳菜附着正投影面积与输水建筑物壁面的比值(面积占比)表征室内模型中淡水壳菜附着密度^[17],设置模型内壁附着面积占比分别为 4.8%、5.8%、6.0%。

1.2 多孔介质域

根据已有研究^[6,13],采用多孔介质域模拟建筑物壁面生物附着层对水流的扰动效应,多孔介质模拟方法是将流动区域中固体结构的作用看作是附加

在流体上的分布阻力,在动量方程中新增源项来表明多孔介质的阻力作用,源项方程为

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (1)$$

式中: S_i 为第 $i(x,y,z)$ 方向的动量方程源项; v_j 为流速; D_{ij} 为黏性损失项; C_{ij} 为惯性损失项; μ 为动力黏滞系数; ρ 为流体密度。

对于各向同性多孔介质,式(1)可简化为

$$S_i = - (D_1 \mu v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j) \quad (2)$$

其中 $D_1 = 150/D_p^2 [(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3]$
 $C_2 = 3.5(1-\varepsilon)/D_p \varepsilon^3$

式中: D_1 为黏性损失系数; C_2 为惯性损失系数; ε 为孔隙率; D_p 为颗粒平均直径。

制作淡水壳菜实体并采用排水体积法确定不同附着密度的孔隙率^[18],各参数计算结果见表 1。

表 1 多孔介质域参数

面积占比/%	孔隙率/%	黏性损失系数		惯性损失系数	
		沿水流方向	管道径向	沿水流方向	管道径向
1.2	97.02	9 126.11	162.24	28.57	3.81
2.4	95.88	18 095.85	321.70	40.95	5.46
4.8	92.45	47 801.42	849.80	69.06	9.21
6.0	91.20	95 597.01	1 699.50	101.44	13.53
8.4	87.78	207 155.45	3 682.76	158.16	21.09
12.0	82.26	530 194.85	9 425.69	278.92	37.19

1.3 计算域及工况设置

本文采用 HYPERMESH 软件来生成结构化网格,在保证网格质量的同时减少整体网格单元数目。根据现场调研结果建立不同附着面积占比的多孔介质域,设置长度为 12 m。淡水壳附着区段生成网格单元为 463 276 个,网格节点为 530 432 个;其他区域网格单元为 1 899 726 个,网格节点为 1 912 242 个。进口设置为速度入口,出口设置为压力出口,三维流体模型见图 2。

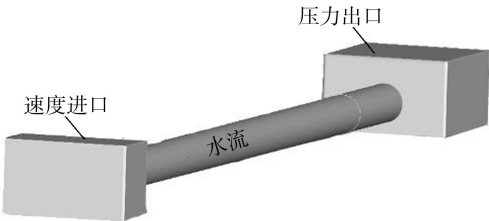


图 2 三维流体模型

采用数值仿真对淡水壳菜附着下的有压输水工程的水流特性进行模拟,根据相关调研结果,有压输水建筑物中附着面积占比和附着厚度变化较为明显,本文针对面积占比和附着厚度这两种因素设置不同梯度进行数值仿真研究,如表 2 所示,仿真工况流量均为 0.025 m³/s,共有 7 种孔隙率。

表2 数值仿真工况

工况	孔隙率/%	面积占比/%	附着厚度/cm
1	0	0	0
2	97.02	1.2	0.5
3	95.88	2.4	0.5
4	92.45	4.8	1.0
5	91.20	6.0	1.0
6	87.78	8.4	1.5
7	82.26	12.0	1.5

2 数值模型验证

糙率可反映管壁表面影响水流阻力的各种因素,通过对比数值仿真与物理试验所得糙率,验证数值仿真模型的可靠性,根据式(3)、式(4)计算不同工况下的糙率^[19];分别监测进出口断面,得到物理试验结果如表3所示。

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 u_1}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 u_2}{2g} + h_f \quad (3)$$

$$h_f = h_y + h_j = 10.29n^2 \frac{L}{d^{5.33}} Q^2 + 0.083 \sum \frac{\xi}{d^4} Q^2 \quad (4)$$

式中: Z_1 、 Z_2 分别为断面1、断面2处的位置水头; p_1 、 p_2 分别为断面1、断面2处的压强; α_1 、 α_2 分别为断面1、断面2处的动能损失系数; u_1 、 u_2 分别为断面1、断面2处的流速; h_f 、 h_y 、 h_j 分别为管道总水头损失、沿程水头损失、局部水头损失; ξ 为管道局部阻力系数; n 为管道糙率; d 为管道直径; L 为测试断面距离; Q 为测试流量; g 为重力加速度。

表3 物理试验糙率计算结果

面积占比/%	雷诺数/ 10^5	流速/(m/s)		水头/cm		糙率
		断面1	断面2	断面1	断面2	
4.8	1.18	0.177	0.176	44.53	44.42	0.016460
5.8	1.14	0.174	0.168	44.61	44.51	0.016597
6.0	1.15	0.176	0.168	44.57	44.47	0.016765

由于仿真模型为理想模型且采用多孔介质近似模拟淡水壳菜附着层,以及不考虑测量误差和制造工艺精度等影响因素,因此仿真值与试验值存在一定误差,最大相对误差在10%以内(表4),符合精

度要求。

表4 物理试验与数值仿真糙率对比

面积占比/%	物理试验结果	数值仿真结果	相对误差/%
4.8	0.016416	0.014992	8.67
5.8	0.016597	0.015118	8.91
6.0	0.016765	0.015477	7.68

3 数值仿真结果分析

a. 流速分布。为研究不同面积占比对水流流态的影响,提取建筑物中间纵向剖面,分析流速变化及内部水流流动特性。由图3可知,不同面积占比条件下,管道内整体上流速变化趋势相似,流速沿程减小,附着层内的局部流速明显小于管道内部。高面积占比管道内主流区域明显大于低面积占比管道,并且管道内流速受到的扰动随密度增大而增强,但流速分布较为均匀^[20]。出现这种现象的原因如下:淡水壳菜的不断繁殖生长,缩小了模型过水断面,并且增大了附着密度,相当于孔隙率减小和面积占比增大,造成阻水能力增强,沿程流速减小,导致管道流速分布变化,最终对输水建筑物过流能力造成不利影响。

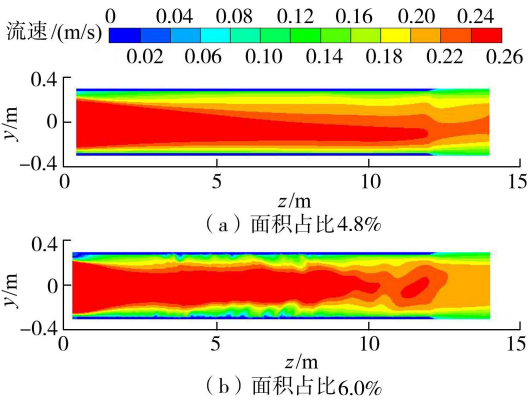


图3 不同面积占比条件下的流速仿真云图

b. 湍动能变化规律。湍动能越大说明水体越不稳定,质点交换越频繁;受到壁面糙体阻水的影响,管道壁面附近的湍动能较大,在附着区域出现了湍动能极值^[21]。由图4可知,不同面积占比下湍动

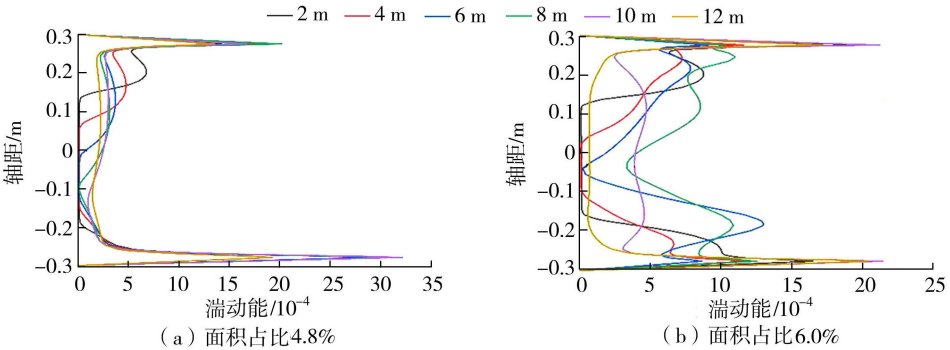


图4 湍动能垂向分布沿程变化

能的沿程发展均表现出越来越对称的趋势,且面积占比为6.0%时的湍动能变化明显大于面积占比为4.8%时的湍动能,说明面积占比增大进一步增强了管道内的湍流强度。同时发现,沿程湍动能变化逐步稳定,其变化曲线呈现出上下对称结构。出现上述现象的原因为壁面附近处水流受到淡水壳菜附着的影响,造成壁面切应力较大,使得脉动流速增强和湍动强度增大^[22-23];而在管道中间部位,水流湍动强度较小,水流的动量交换比较稳定。

c. 湍动能耗散率变化规律。湍动能耗散率垂向分布沿纵向的变化见图5。由图5可知,不同面积占比下湍动能耗散率基本分布规律与湍动能相似,管道中部区域湍动能耗散率较小,壁面附近水流速度慢,但湍动能耗散率大,这说明壁面对水流的摩擦阻力较大以及流速梯度大造成湍动能耗散较快^[24]。而最大流速发生在中部区域,该区域水流流动较快且流线较为集中,因此水流不断产生能量,能量耗散较少,造成水流流速梯度小,湍动耗散率也较小^[25]。

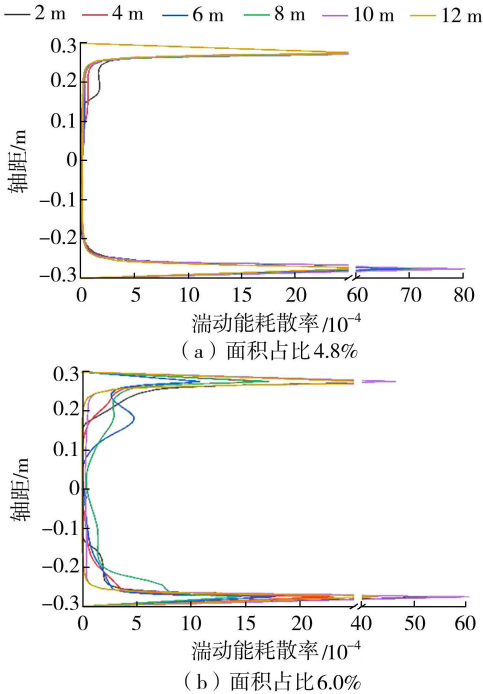


图5 湍动能耗散率垂向分布沿程变化

d. 断面流速分布变化规律。断面流速垂向分布沿程变化见图6,由图6可知,不同面积占比下进口处断面流速纵向分布较为均匀,水体流动受到管道壁面糙体影响,逐步向管道中轴线集中,造成主流偏移;高面积占比造成的主流偏移影响明显小于低面积占比,但其对应的最大流速明显大于低面积占比^[26]。面积占比为4.8%时断面流速分布沿程变化较为规律,但管道下部糙体对水流扰动小于上部,使得最大流速出现在管道轴线中下部;在面积占比为6.0%时进口断面流速分布与末端类似,并且进

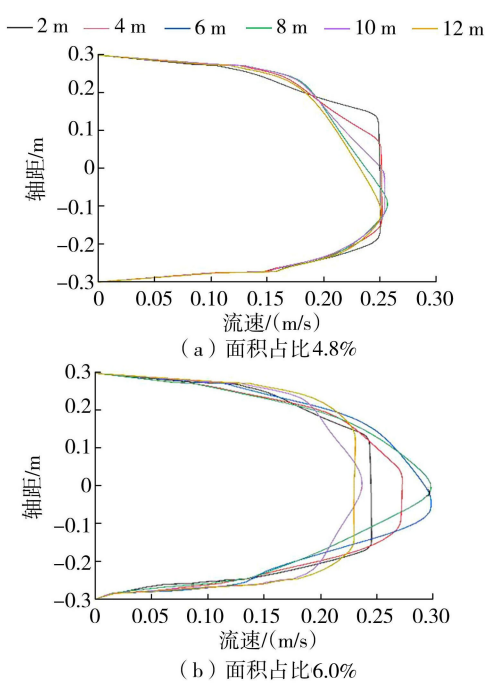


图6 断面流速垂向分布沿程变化

口断面流速大于末端。一方面,淡水壳菜附着造成壁面湍动能随面积占比增大,其分布情况逐步对称;另一方面,当附着面积占比增大到一定程度,淡水壳菜对管道水流的影响与缩小过水断面面积时的水流状态类似。因此,壁面淡水壳菜附着现象造成了水流向中部集中,最大流速出现在管道中轴线处^[27],使得断面流速分布曲线由“对数”形变为“抛物线”形,呈现出“层流”特征^[28]。

e. 断面糙率分析。断面1、断面2分别距离管道进口2、12 m,对两断面间糙率进行计算,结果见表5。进一步分析糙率与面积占比及厚度的关系,根据数值仿真成果拟合糙率经验方程并绘制三维曲面。结果表明,淡水壳菜附着造成管道糙率增加,且糙率随淡水壳菜面积占比增大而增大,在面积占比由0增大至6.0%时糙率增长了0.003 951,其递增速率明显大于面积占比由6.0%增至12.0%。同时说明在较高面积占比下,淡水壳菜附着个数不再是造成糙率增大的主要因素。淡水壳菜面积占比与厚度对管道糙率产生影响,在面积占比较低时,附着厚

表5 不同工况下的糙率

面积占比/%	附着厚度/cm	流速/(m/s)		压强/Pa		糙率
		断面1	断面2	断面1	断面2	
0	0	0.1763	0.1748	22.029	17.290	0.011 526
1.2	0.5	0.1768	0.1752	23.639	17.111	0.013 414
2.4	0.5	0.1772	0.1754	24.829	17.441	0.014 244
4.8	1.0	0.1778	0.1755	25.763	17.604	0.014 992
5.7	1.0	0.1778	0.1756	25.958	17.627	0.015 118
6.0	1.0	0.1789	0.1758	26.318	17.663	0.015 477
8.4	1.5	0.1792	0.1757	26.837	17.712	0.015 916
12.0	1.5	0.1789	0.1757	27.196	17.742	0.016 153

度对糙率的影响明显小于附着厚度;而在面积占比
较高时,附着厚度对糙率的影响明显大于附着厚度,
通过综合两种因素对糙率的影响,初步提出有压输
水建筑糙率经验公式:

$$n = 0.011530 + 0.001381g(8000a)b^{0.3137} \quad (5)$$

式中:*a* 为面积占比;*b* 为附着厚度。

采用物理试验对式(5) 计算精度进行验证,如
表 6 所示。同等工况下式(5) 计算糙率略小于物理
试验结果,相对误差为 8.04% ~ 9.16%,其精度可
满足使用要求。

表 6 物理试验与公式计算糙率对比

面积占比/%	物理试验糙率	公式计算糙率	相对误差/%
4.8	0.016416	0.015096	8.04
5.8	0.016597	0.015206	8.38
6.0	0.016765	0.015230	9.16

因多孔介质域仅可反映淡水壳菜为均匀附着的情
况,为保证公式计算精度,在推广应用该经验公式
时需满足以下条件:①仅适用于圆形有压输水建筑
物;②淡水壳菜附着均匀,实际工程的面积占比是淡
水壳菜与计算区域整体壁面的比值;③实际工程的
附着厚度为计算区域间的均值;④实际工程的原始
壁面糙率不得大于 0.012;⑤将实际有压输水建筑
物壁面淡水壳菜面积占比等比例缩小,附着厚度以
过水断面为基准通过下式等效转化:

$$\frac{S_{e原}}{S_{原}} \frac{1}{\lambda_L^2} = \frac{S_{e转}}{S_{转}} \quad (6)$$

式中:*S_{e原}* 为原位建筑附着层面积;*S_原* 为原位建筑横
断面面积;*S_{e转}* 为转化后建筑附着层面积;*S_转* 为转化
后建筑横断面面积;*λ_L* 为缩尺比。

根据文献[29]中的鱼洲-高新沙段输水隧洞实
际测量数据对式(5) 的推广应用进行初步验证,采
用式(5) 计算隧洞运行 1 a 后的糙率为 0.0153,与输
水隧洞实际测量糙率 0.0145 仅存在 5.52% 的误
差,初步说明该经验公式可应用于类似工程。

4 结 论

a. 管道壁面附近水流受到糙体影响,湍动能和
湍动能耗散率值较大,湍流强度明显随面积占比增
大而增大,说明淡水壳菜附着使得有压管道内水流
质点动量交换更加剧烈。

b. 淡水壳菜附着会改变流场的分布,使主流转
向有压管道中轴线,不同面积占比造成的影响不同。
面积占比 4.8% 时,主流偏向于管道轴线下部;面积
占比增至 6.0% 时,主流偏向于有压管道轴线,管内
主流流速随密度增大趋势明显,断面流速分布呈现
“层流”特征。

c. 初步提出了有压输水建筑糙率经验公式,综
合考虑了淡水壳菜面积占比与厚度的影响效应,并得
到了与物理试验结果符合良好的计算结果,说明由有
压输水建筑糙率经验公式所得的结果是较为可靠的。

参考文献:

[1] 欧祖贤. 淡水壳菜对渠道输水能力的影响研究[D]. 邯
郸: 河北工程大学, 2020.

[2] 李坚波, 钟伟. 海生物附着对螺旋桨推进性能影响的
数值模拟[J]. 中国水运, 2006, 12 (19): 9-10. (LI
Jianbo, ZHONG Wei. Numerical simulation of the effect of
marine organisms attachment on propeller propulsion
performance[J]. China Water Transport, 2006, 12 (19):
9-10. (in Chinese))

[3] 严天豪, 孙育哲. 沼蛤对抽水蓄能电站管道的危害及
防治[J]. 水电站机电技术, 2019, 42 (11): 79-81.
(YAN Tianhao, SUN Yuzhe. Harm and prevention of
limnoperna fortunei to pumped storage power station
pipeline [J]. Mechanical & Electrical Technique of
Hydropower Station, 2019, 42 (11): 79-81. (in
Chinese))

[4] 李代茂. 淡水壳菜对输水建筑物输水能力的影响研究
[J]. 给水排水, 2009, 45 (增刊 1): 94-96. (LI
Daimao. Study on the influence of golden mussel on the
water conveyance capacity of water conveyance building
[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45
(Sup1): 94-96. (in Chinese))

[5] 冯文涛. 淡水壳菜对东深供水工程司马有压箱涵糙率
影响分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2016, 52 (4): 10-
13. (FENG Wentao. Influence analysis of limnoperna on
the coarsening ratio of sima’s pressurized box in dongshen
water supply project [J]. Gansu Water Resources and
Hydropower Technology, 2016, 52 (4): 10-13. (in
Chinese))

[6] DONG Tiaojian, GUO Hai. Numerical simulation of the
hydrodynamic behavior of mussel farm in currents[J].
Ships and Offshore Structures, 2018, 13(8): 835-846.

[7] CONSTANTINESCU G, MIYAWAKI S, LIAO Q. Flow
and turbulence structure past a cluster of freshwater
mussels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139
(4): 347-358.

[8] O’ DONNCHA F, JAMES S C, RAGNOLI E. Modelling
study of the effects of suspended aquaculture installations
on tidal stream generation in Cobscook Bay [J].
Renewable Energy, 2017, 102: 65-76.

[9] LIN J, DENG M, ZHANG S, et al. Seasonal variation of
surface water temperature and its ecological impacts in a
mussel aquaculture farm[J]. Journal of Shanghai Ocean
University, 2016, 25(6): 918-926.

[10] KERVELLA Y, GERMAIN G, GAURIER B, et al.
Experimental study of the near field impact of an oyster
table on the flow[J]. European Journal of Mechanics,

- 2010, 29: 32-42.
- [11] ANDREWARTHA J, PERKINS K, SARGISON J, et al. Drag force and surface roughness measurements on freshwater biofouled surfaces[J]. Biofouling, 2010, 26: 487-496.
- [12] 张海玲, 霍铁珍, 郭彦芬, 等. 模袋混凝土渠道糙率影响因素数值模拟研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 157-160. (ZHANG Hailin, HUO Yizhen, GUO Yanfen, et al. Numerical simulation study on the factors affecting the roughness of bag concrete channel[J]. Yellow River, 2019, 41(2): 157-160. (in Chinese))
- [13] 槐文信, 韩杰, 曾玉红, 等. 淹没柔性植被明渠恒定水流水力特性的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 791-797. (HUAI Wenxin, HAN Jie, ZENG Yuhong, et al. Experimental study on hydraulic behaviors of steady uniform flow in open channel with submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 791-797. (in Chinese))
- [14] 胡锐. 生物附着对圆柱水动力特性的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [15] 周峰, 娄厦, RADNAEVA D L, 等. 柔性植物影响下水沙运动及物质运输研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 107-116. (ZHOU Feng, LOU Sha, RADNAEVA D L, et al. Research progress on sediment movement and substance transport in flows with flexible vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 107-116. (in Chinese))
- [16] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [17] 李甲振, 郭永鑫, 甘明生, 等. 河工模型试验加糙方法综述[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 129-135. (LI Jiazhen, GUO Yongxin, GAN Mingsheng, et al. Overview of roughening methods in river model experiments [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 129-135. (in Chinese))
- [18] 李洋. 植草护岸糙率试验研究及数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [19] 李新, 谢晓勇. 大型倒虹吸工程水头损失及水力计算[J]. 人民长江, 2017, 48(20): 71-75. (LI Xin, XIE Xiaoyong. Water head loss and hydraulic calculation of large inverted siphon project[J]. Yellow River, 2017, 48(20): 71-75. (in Chinese))
- [20] 李欢, 曾亚武, 夏磊, 等. 圆管壁粗糙度对圆管内流态影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 45-50. (LI Huan, ZENG Yawu, XIA Lei, et al. Effects of pipe roughness on flow pattern within circular pipe[J]. Journal of Water Roughness and Architectural Engineering, 2016, 14(2): 45-50. (in Chinese))
- [21] 郝鹏飞, 姚朝晖, 何枫. 粗糙微管道内液体流动特性的实验研究[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4728-4732. (HAO Pengfei, YAO Zhaohui HE Feng. Experimental study of flow characteristics in rough microchannels[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4728-4732. (in Chinese))
- [22] 吴福生. 含植物明渠水动力特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [23] 刘宏哲, 娄厦, 刘曙光, 等. 含植物水流动力特性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 85-94. (LIU Hongzhe, LOU Sha, LIU Shuguang, et al. Advances in hydrodynamic characteristics of flows with vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4): 85-94. (in Chinese))
- [24] 陈彬, 刘阁. 槽道流 POD 重构及湍流动能耗散率分析[J]. 计算物理, 2018, 35(2): 169-177. (CHEN Bin, LIU Ge. Analysis of kinetic energy dissipation rate and POD reconstruction of a channel flow[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2018, 35(2): 169-177. (in Chinese))
- [25] 刘志宇, 魏皓. 黄海潮流底边界层内湍动能耗散率与底应力的估计[J]. 自然科学进展, 2007, 17(3): 362-369. (LIU Zhiyu, WEI Hao. Estimation of turbulent kinetic energy dissipation rate and bottom stress in the Yellow Sea tidal bottom boundary layer[J]. Progress in natural Science, 2007, 17(3): 362-369. (in Chinese))
- [26] 张维乐, 吴时强, 吴修锋, 等. 连续分布均匀沉水植被明渠水流流速分布比较[J]. 水力发电学报, 2021, 40(10): 30-44. (ZHANG Weile, WU Shiqiang, WU Xiufeng, et al. Comparison of flow velocity distributions in open channel with continuous and uniform submerged vegetation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(10): 30-44. (in Chinese))
- [27] 刘昭伟, 陈永灿, 朱德军, 等. 灌木植被水流的流速垂向分布[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 237-241. (LIU Zhaowei, CHEN Yongcan, ZHU Dejun, et al. Vertical profile of horizontal velocity of flow through shrubs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 237-241. (in Chinese))
- [28] 冯建军, 朱国俊, 贺锐, 等. 表面粗糙度对轴流泵性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 196-202. (FENG Jianjun, ZHU Guojun, HE Rui, et al. Influence of wall roughness on performance of axial-flow pumps [J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2016, 44(3): 196-202. (in Chinese))
- [29] 秦晓川. 珠江三角洲水资源配置工程输水隧洞糙率取值范围研究[J]. 广东水利水电, 2021(4): 31-34. (QIN Xiaochuan. Study on the value range of roughness of water conveyance tunnel in the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(4): 31-34 (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-05 编辑:骆超)