

气泡幕水动力特性数值模拟

赵文彬¹, 黄筱云^{1,2}, 夏波^{1,2}, 程永舟^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了解浅水条件下气泡幕的作用机制, 明确其水动力特征参数, 并探究水深、单宽供气量两个因素对特征参数的影响, 运用 OpenFOAM 开展基于双流体模型的气泡幕水动力特性数值模拟研究, 并提出了浅水气泡幕垂向流速、水平流速以及气泡幕最大作用效率的估算方法。结果表明: 在 0.5 m 水深至 0.2 倍水深深度的范围内, 气泡羽流中心速度沿程保持不变, 气泡羽流水平宽度沿程呈线性增长; 距气泡幕 0.25 倍水深处, 表层流速最大, 水平流厚度最小, 随后表层流速沿程线性减小; 水平流厚度在 0.15 倍到 0.4 倍水深之间。

关键词: 浅水; 气泡幕; 水动力特性; 数值模拟; OpenFOAM

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)04-0016-08

Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of bubble curtains//ZHAO Wenbin¹, HUANG Xiaoyun^{1,2}, XIA Bo^{1,2}, CHENG Yongzhou^{1,2} (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Science and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of bubble curtains in shallow water, clarify their hydrodynamic characteristic parameters, and investigate the influence of water depth and air supply rate per unit width on these parameters, a numerical simulation study on the hydrodynamic characteristics of bubble curtains was conducted using OpenFOAM based on the two-fluid model. Methods were proposed for the estimation of vertical velocity, horizontal flow velocity, and maximum efficiency of bubble curtains in shallow water. The results show that in the range from a water depth of 0.5 m to 0.2 times the water depth, the central velocity of the bubble plume remains constant along its path, and the horizontal width of the bubble plume increases linearly. At a distance of 0.25 times the water depth from the bubble curtain, the surface flow velocity reaches its maximum, and the thickness of the horizontal flow is the minimum. Then, the surface flow velocity decreases linearly along the flow path. The horizontal thickness ranges from 0.15 to 0.4 times the water depth.

Key words: shallow water; bubble curtain; hydrodynamic characteristics; numerical simulation; OpenFOAM

河湖疏浚会造成底泥悬浮、水体浑浊, 悬浮泥沙在水流、风等自然因素作用下向外扩散^[1-2]。为减小疏浚带来的环境压力, 常采用防污帘包围作业水域。然而, 漂浮在水中的防污帘会妨碍船舶航行。目前, 一种替代方案是将防污帘与气泡幕相结合^[3]。气泡幕是由水下开孔管持续释放空气形成的水下气泡墙。气泡在压力和表面张力的作用下会携带周围水体一同运动, 产生向上的气泡羽流。向上运动的气泡羽流碰到水面后将发生偏转, 转变成向两侧流动的表层流。气泡幕拦浑机理为悬浮颗粒在气泡羽流

作用下输运至水面表层, 并在水平流的作用下远离气泡幕^[4]。目前, 气泡幕拦浑研究较少, 且多为室内或现场试验研究。例如: 吴贵江等^[5]通过室内试验研究了气泡幕对溶解性污染物的扩散控制; Cutroneo 等^[4]通过气泡幕拦浑现场试验测试了不同水文条件下气泡幕拦浑效果; 李智等^[6]采用 CFD 仿真方法研究了气泡幕防悬浮物扩散特性; Cheng 等^[7]研究了低速横流条件下气泡幕拦浑效果; 常聪聪等^[8]通过室内试验测试了气泡幕对两种粒径高岭土颗粒的拦截效果。上述研究皆证实气泡幕具备

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52171245)

作者简介: 赵文彬(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事气泡幕应用研究。E-mail: 249333591@qq.com

通信作者: 黄筱云(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事气泡幕应用研究。E-mail: xiaoyun.huang@csust.edu.cn

一定的拦浑能力,其拦浑效果与水深和单宽供气量有关,但均未提出气泡幕拦浑的理论模型。除拦浑外,气泡幕还被用于消波^[9]、围油^[10]、防咸^[11]、融冰^[12]、消层^[13]、增氧^[14]、聚肥^[15]、消噪^[16]、减震^[17]、控鱼^[18]等方面。在大部分应用中,气泡幕的作用效果与其水动力特性密切相关。

在气泡幕水动力特性的理论研究方面,Taylor等^[19]基于热羽流理论最早提出了气泡幕水动力模型;Abraham等^[20]假定羽流向上速度呈高斯分布,提出了气泡羽流模型;Kobus^[21]根据质量和动量守恒方程给出了气泡羽流的理论模型;Cederwall等^[22]引入掺混系数建立了气泡羽流模型;Brevik等^[23]基于纳维-斯托克斯方程建立了气泡幕水动力理论模型。在实验研究方面,Bulson^[24]于南安普敦Trafalgar船坞开展了气泡幕水动力特征研究;Kurihara^[25]开展了气泡幕消波现场试验研究;Tekeli等^[26]研究了曝气孔上方的流场特征;Tsang^[27]提出了气泡幕比尺试验相关理论;Leifer等^[28]开展了气泡幕阵列的水动力特征研究。虽然上述研究有力地揭示了气泡幕的水动力特征,但还存在不足,主要表现在对气泡幕水动力特征的描述不够深入,基于物理试验的经验和理论公式可能只对特定气泡幕尺度有效,无法拓展。为探究气泡幕流场细节,张成兴等^[29]运用两相流模型对气泡幕产生的水平流进行了研究。两相流模型也被其他学者用于气泡幕模拟^[30-31],该模型采用VOF方法捕捉气液界面变化,需要用小尺度网格刻画气泡,计算成本高。Dhotre等^[32]则采用双流体模型模拟大尺度气泡羽流流动;常聪聪等^[33]也采用该模型对气泡幕抑制咸水入侵进行模拟。相较于两相流模型,双流体模型无需捕捉气泡运动,而是通过概化模型处理气泡羽流中水-气相互作用,但需要提前预估气泡幕中气泡的尺寸。浅水条件下,气泡上浮时间短,气泡尺寸变化小,采用双流体模型更加合适,但基于双流体模型的气泡幕水动力特性的相关研究还不多见。

为深刻理解气泡幕作用机制,本文基于双流体模型,运用OpenFOAM模拟多种设计工况下气泡幕周围流场运动,分析气泡羽流与水平流特征,弄清气泡羽流和水平流的强度及尺度与水深、单宽供气量两因素之间的关系,并给出气泡幕水动力特征参数计算方法,以期为建立气泡幕拦浑理论模型以及气泡幕拦浑设计提供参考。

1 数值模型

1.1 双流体模型

双流体模型方程的表达式为

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i) = -\alpha_i \nabla P + \nabla \cdot (\alpha_i \boldsymbol{\tau}_i) + \alpha_i \rho_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{l,i} \quad (2)$$

式中: i 取G和L,分别表示气相和液相; t 为时间; ρ_i 、 α_i 、 $\mathbf{u}_i$ 分别为密度、相分数和速度矢量; P 为流体的静压; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\boldsymbol{\tau}_i$ 为应力张量; $\mathbf{F}_{l,i}$ 为两相间表面力。

根据气液两相之间的关系,有

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{l,G} = -\mathbf{F}_{l,L} \quad (4)$$

动量方程中的应力张量按下式计算:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mu_{\text{eff},i} \nabla \mathbf{u}_i + (\nabla \cdot \mathbf{u}_i) \mathbf{I} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}_i) \mathbf{I} \quad (5)$$

其中

$$\mu_{\text{eff},G} = \frac{\rho_G}{\rho_L} \mu_{\text{eff},L}$$

式中: $\mu_{\text{eff},i}$ 为有效黏滞系数; $\mathbf{I}$ 为单位张量。

气泡羽流中,有效黏滞系数由三部分构成,即分子黏滞系数 $\mu_{L,L}$ 、紊动黏滞系数 $\mu_{T,L}$ 和气泡引起的紊动附加项 $\mu_{\text{BI},L}$ 。

水流紊动黏滞系数为

$$\mu_{T,L} = \rho_L (C_s \Delta)^2 |S| \quad (6)$$

式中: C_s 为Smagorinsky常数,本文取0.12; Δ 为过滤器尺寸,大小等于网格体积的立方根; S 为应变张量的过滤率。

气泡引起的紊动附加项为

$$\mu_{\text{BI},L} = \rho_L C_{\mu,\text{BI}} \alpha_G d_B |\mathbf{u}_G - \mathbf{u}_L| \quad (7)$$

式中:系数 $C_{\mu,\text{BI}}$ 取0.6; d_B 为气泡直径,本文取2.5 mm。

两相间表面作用力包括拖曳力 $\mathbf{F}_D$ 、升力 $\mathbf{F}_L$ 、虚拟质量力(考虑气泡对周围水体所作的功) $\mathbf{F}_{\text{VM}}$ 和紊动耗散力 $\mathbf{F}_{\text{TD}}$:

$$\mathbf{F}_D = \frac{3}{4} \rho_L \alpha_G C_D \frac{|\mathbf{u}_G - \mathbf{u}_L|}{d_B} (\mathbf{u}_G - \mathbf{u}_L) \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_L = -\rho_L \alpha_G C_L (\mathbf{u}_G - \mathbf{u}_L) \times (\nabla \times \mathbf{u}_L) \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{\text{VM}} = C_{\text{VM}} \rho_L \alpha_G \left(\frac{D\mathbf{u}_L}{Dt} - \frac{D\mathbf{u}_G}{Dt} \right) \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{\text{TD}} = -C_{\text{TD}} C_D \frac{\mu_t}{Sc_t} \left(\frac{\alpha_G}{\alpha_G} - \frac{\alpha_L}{\alpha_L} \right) \quad (11)$$

其中 $C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15Re^{0.687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$

$$Re = \rho_L |\mathbf{u}_G - \mathbf{u}_L| d_B / \mu_{L,L}$$

式中: C_L 为升力系数,当横流较小时,升力较拖曳力小得多,可忽略; C_{VM} 为虚拟质量力系数,取0.5; μ_t 为湍流黏度; Sc_t 为湍流Schmidt数,可取0.9; C_{TD}

为紊动耗散力系数,可取1。

1.2 模型验证

为验证数值模型的有效性,将新模型与常聪聪等^[8]的物理试验进行比较。该物理试验在长沙理工大学水利实验中心进行,试验水槽长40 m,宽2 m,水深0.5 m,见图1。纳米曝气管垂直于水槽方向布置,沿水槽长度方向布置多个测量断面,每个断面沿水槽宽度设置5个测点,将5个测点的结果取平均得到断面均值。

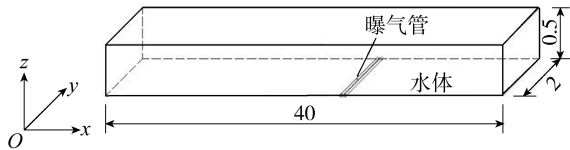


图1 试验水槽示意图(单位:m)

气泡幕水动力数值模型基于 OpenFOAM 建立。本文主要探讨气泡幕水动力二维特征,计算域尺寸取40 m×0.05 m×0.5 m。上部边界设为出流边界,速度梯度为零,压力为大气压;底部中央的曝气管采用单缝代替,设为入流边界,给定速度值,压力梯度为零;其余部分设为固壁边界,也采用滑移边界条件。划分计算区域时,竖向和展向采用均匀划分策略,横向则采用渐变划分策略。三个方向的最小网格尺寸保持一致,分别采用20、10、5 mm。相应地,横向网格数分别为2000、4000和8000。

当气泡幕的单宽供气量为25 L/(min·m)时,在不同网格尺寸(20、10、5 mm)下距曝气管1.5倍水深断面(简称1.5倍水深断面)上的水平流速 u 的分布见图2,图中 d 为深度,即该点至水面的距离。图3为气泡幕一侧不同位置断面上表层水平流

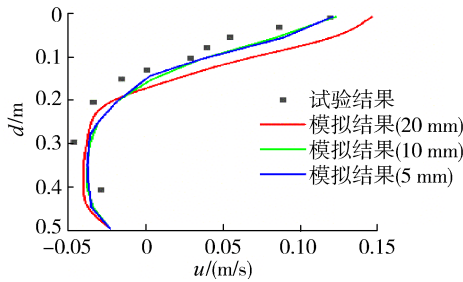


图2 不同网格尺寸下1.5倍水深断面水平流速分布比较

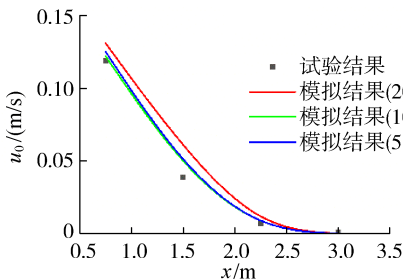


图3 不同网格尺寸下表层水平流速沿程分布比较

速 u_0 的沿程分布。可以看出,数值模拟结果与试验结果基本吻合,数值模型能够较好地重现物理试验过程,当最小网格尺寸小于20 mm时,数值模拟结果变化很小。

2 数值模拟试验

2.1 试验工况

根据文献^[27],气泡羽流中任一点垂向速度 v 的表达式可写为

$$v = f(Q_0, D, \rho, d, \mu, g, \sigma, D_0, x) \quad (12)$$

式中: Q_0 为标准大气压下单宽曝气量; D 为水深; ρ 为水的密度; μ 为水的黏滞系数; g 为重力加速度; σ 为表面张力; D_0 为标准大气压对应的水柱高度; x 为该点至羽流中心的距离。本文忽略水的黏滞性和表面张力作用,水的密度为常数,假定气泡维持在等温条件,水底气泡幕单宽供气量 Q 为

$$Q = Q_0 \frac{D_0}{D_0 + D} \quad (13)$$

式(12)写成无量纲形式:

$$v' = \frac{v}{(gQ)^{1/3}} = f_w\left(\frac{d}{D}, \frac{x}{D}\right) \quad (14)$$

类似地,气泡幕产生的无量纲水平流速 u' 的表达式为

$$u' = \frac{u}{(gQ)^{1/3}} = f_u\left(\frac{d}{D}, \frac{x}{D}\right) \quad (15)$$

根据上述分析,设计数值模拟试验的工况。单宽供气量 Q 取15、30、45、60、75 L/(min·m),水深 D 取0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m。模拟试验水槽长度仍为40 m,宽度为0.05 m,竖向和展向仍采用均匀网格,横向采用渐变网格,最小网格尺寸为1 cm。

2.2 数值模拟试验结果

当气泡幕开启后,气泡上升促使水体流动,形成气泡羽流。气泡羽流强度随时间逐渐加大。持续供气一段时间后,气泡羽流强度将保持恒定。图4(a)为水深为1.5 m、单宽供气量为45 L/(min·m)时,0.5 m深度处气泡羽流的垂向流速分布;图4(b)则为该工况下2倍水深断面的水平速度分布,图中 t 为供气时间。可以看出,持续供气50 s后,气泡羽流垂向速度分布与水平流速剖面几乎不变。故可认为气泡幕持续供气50 s后,气泡幕水动力特征参数将保持稳定。下面讨论的数据均为持续供气50 s后的测量结果。

相关物理试验均显示气泡羽流内同一深度上的垂向速度一般呈高斯分布^[34]。图5为水深为0.5 m、单宽供气量 Q 分别为15、75 L/(min·m)时,气泡羽流垂向速度沿深度的变化。图6为水深为

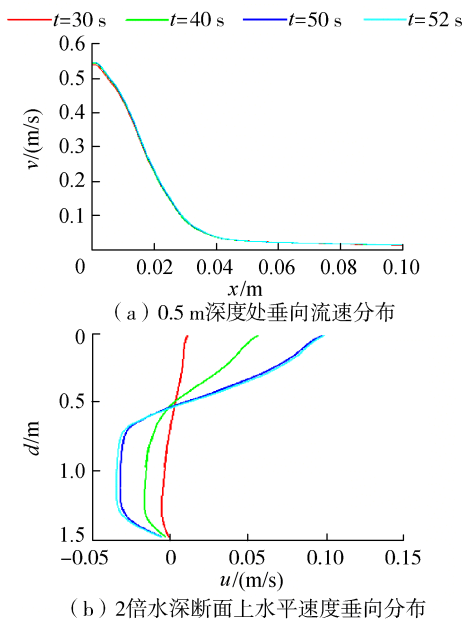


图4 不同供气时间气泡幕周围流速分布

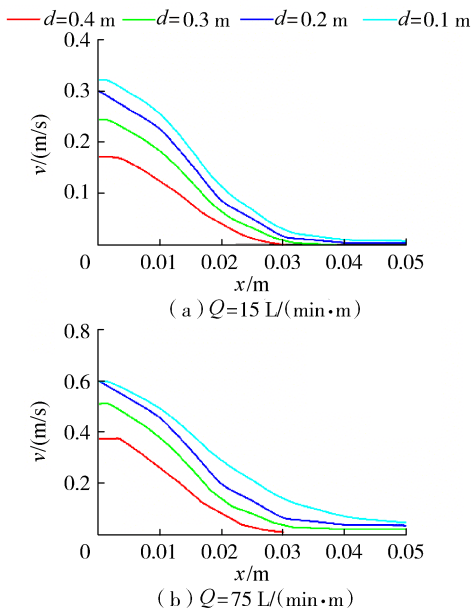


图5 0.5 m水深下气泡羽流的垂向速度沿深度的变化

2.5 m 时不同单宽供气量的气泡羽流垂向速度沿深度的变化。本文定义垂向速度仅为羽流中心 5% 的位置是气泡羽流边界,水平方向上羽流边界到中心的距离为羽流水平宽度。由图 5 和图 6 可知,水深相同时,单宽供气量越大,羽流中心垂向流速越大,单宽供气量增加 4 倍,羽流中心垂向流速增长 1 倍;单宽供气量对羽流水平宽度影响较小,单宽供气量提升至 5 倍,羽流水平宽度却没有显著增加;气泡羽流水平宽度与深度有关,自水底向上逐渐增大,如水深为 2.5 m 时,0.5 m 深度处羽流水平宽度是 2 m 深度处的 4 倍以上。

吴风林等^[34]指出气泡羽流自下而上分为建立区、成型区和表面影响区,建立区和成型区内羽流水

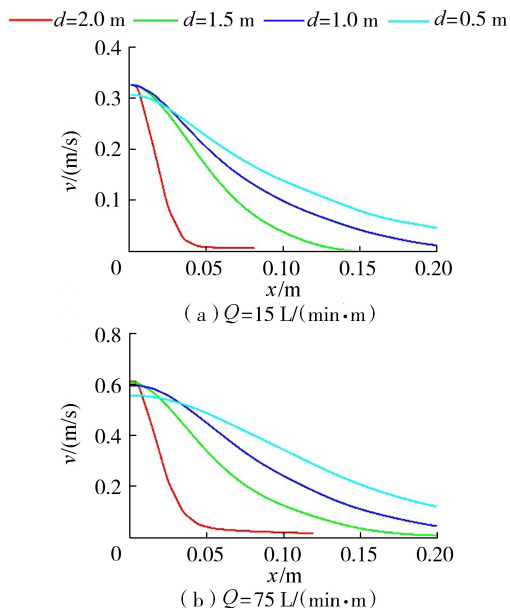
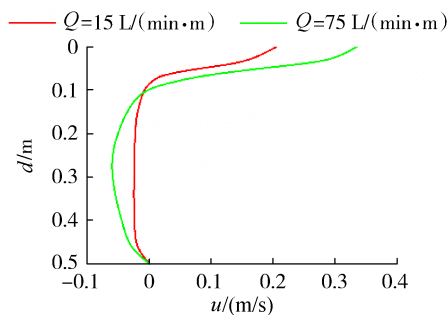


图6 2.5 m水深下气泡羽流的垂向速度沿深度的变化

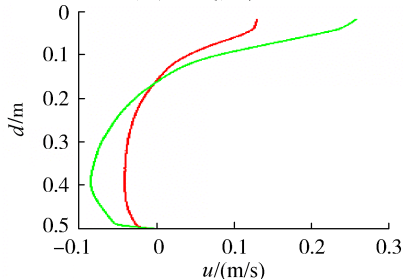
平范围沿深度变化率均保持一致,但建立区内羽流水平宽度沿深度变化率大于成型区内的变化率。从图 6 可以看出,1.5~2 m 深度范围内羽流水平宽度沿深度变化率大于 1~1.5 m 范围内的变化率,而且,随着单宽供气量增加,1.5~2 m 深度范围内的羽流水平宽度竖向变化率也将扩大。比较图 5 和图 6 可知,同一单宽供气量下,距曝气管 0.5 m 高度内的羽流水平宽度变化趋势不受水深的影响。这意味着,当单宽供气量大于 $15 L/(min \cdot m)$ 时,形成的羽流建立区高度差不多为 0.5 m。

向上羽流遇到水面后发生偏转形成水平流。若单宽供气量恒定,水流强度终将维持在某一定值。图 7 和图 8 分别为水深为 0.5 m 和 2.5 m 时,不同单宽供气量下气泡幕形成的水流的水平速度剖面。定义断面上水平流速自最大降为零历经的深度为水平流在该断面上的厚度,称为水平流厚度。可以看出,气泡幕外侧形成上下交错水流,即水平流速沿水深发生翻转,上部水体远离气泡幕,下层水体则向气泡羽流流动;在水面处,水平流速最大,随着深度增加,水平流速逐渐减小;距气泡幕越远,水平流越厚,如 0.5 m 水深时,距气泡幕 0.375 m 的断面上水平流厚度约为 0.1 m,即 0.2 倍水深,而 0.75 m 处的水平流厚度为 0.15 m,即 0.3 倍水深;水平流厚度与水深密切相关,2.5 m 水深时,1.875 m 断面水平流厚度约为 0.6 m,即 0.24 倍水深,3.75 m 处的厚度约为 0.8 m,即 0.32 倍水深;水平流厚度受单宽供气量影响较小,单宽供气量增加 4 倍后,水平流厚度增加量不超过 5%。

气泡幕内水体遇到水面后向两侧流动,周围水体则进入羽流中。持续供气促使气泡幕两侧形成明

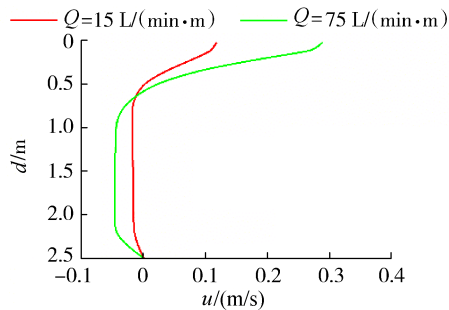


(a) 距气泡幕0.375 m

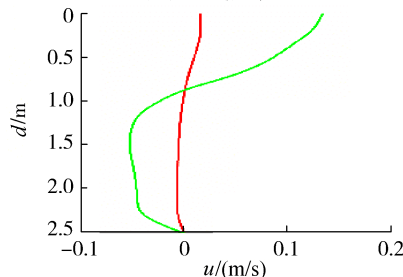


(b) 距气泡幕0.750 m

图7 0.5 m 水深下气泡幕在不同断面形成的水流水平速度分布



(a) 距气泡幕1.875 m

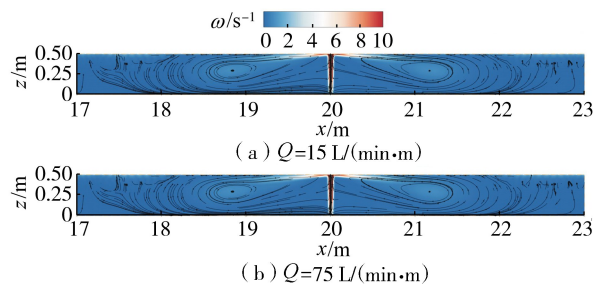


(b) 距气泡幕3.750 m

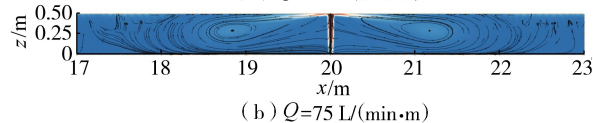
图8 2.5 m 水深下气泡幕在不同断面形成的水流水平速度分布

显的环流。图9和图10分别为0.5 m和2.5 m水深下,不同单宽供气量在气泡幕两侧形成的环流和涡量(ω)分布。可以看出,两侧环流几乎对称,环流的几何特征与水深和单宽供气量有关,当单宽供气量同为15 L/(min·m)时,0.5 m水深下环流范围约为4.5倍水深,环流中心位于0.4倍水深处,距气泡幕约2.4倍水深,2.5 m水深下环流范围约为3.2倍水深,环流中心则在0.2倍水深附近,距气泡幕约0.4倍水深;环流范围和环流中心位置也随单宽供气量提升而增加,单宽供气量增加至5倍后,环流范

围差不多增长20%。气泡幕产生的涡旋主要集中在气泡羽流中,且单宽供气量越大,涡量值越高,单宽供气量增加5倍,最大涡量值增加1倍。

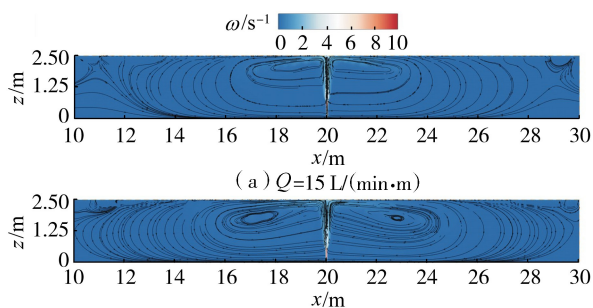


(a) $Q=15$ L/(min·m)

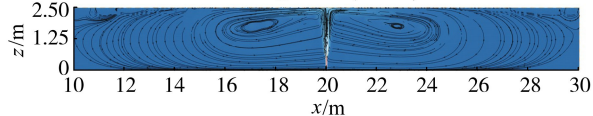


(b) $Q=75$ L/(min·m)

图9 0.5 m 水深下气泡幕周围流线与涡量分布



(a) $Q=15$ L/(min·m)



(b) $Q=75$ L/(min·m)

图10 2.5 m 水深下气泡幕周围流线与涡量分布

3 水动力特征分析

3.1 气泡羽流中心速度

气泡羽流中心速度与单宽供气量密切相关。图11为5种水深下气泡羽流无量纲中心垂向速度分布随单宽供气量的变化。其中, $v'_0 = v_0 / \sqrt[3]{gQ}$, v_0 为中心垂向速度, $d' = d/D$ 。从图11可以看出,在0.2倍水深深度内,中心速度会随深度减小逐渐变为零;而在0.2倍水深深度以下,按照中心速度变化特征可以分为两个部分,一个是增长区,另一个是维持区。除了0.5 m水深条件,其他水深条件下增长区的高度近似为0.5 m。在增长区内,气泡羽流中心速度从零增加至最大;在维持区内,气泡羽流中心速度随深度先稍微减小,而后保持稳定。气泡羽流内最大无量纲中心速度为3,维持区内无量纲中心速度约为2.5。

3.2 气泡羽流水平宽度

根据前面的分析,0.2倍水深深度以上,羽流开始发生偏转,中心速度逐步减小。图12为0.2倍水深深度以下羽流无量纲水平宽度的变化,其中, $b' = b/D$, b 为水平宽度。可以看出,羽流水平宽度受单宽供气量的影响较小,主要与水深有关,在0.2倍水深深度处,羽流水平宽度约为0.12倍水深。根据羽流水平宽度沿深度变化的规律,同样将0.2倍水深深度以下区域分为两个区域。两区域之间分界

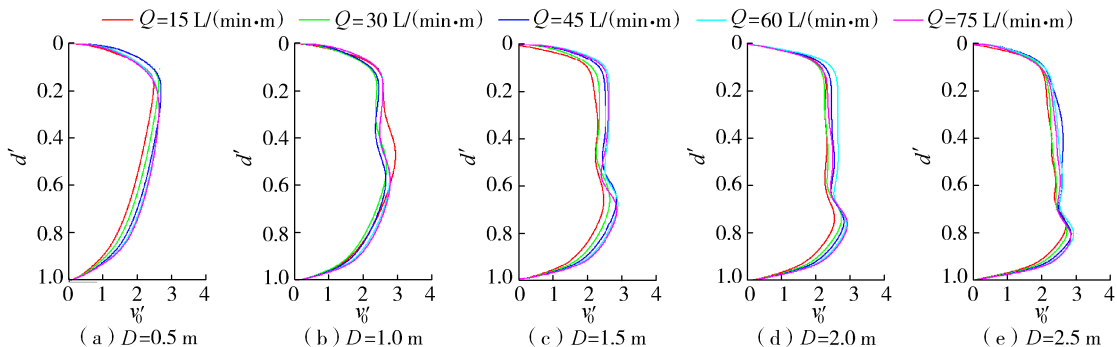


图 11 不同单宽供气量下无量纲中心垂向速度沿水深分布

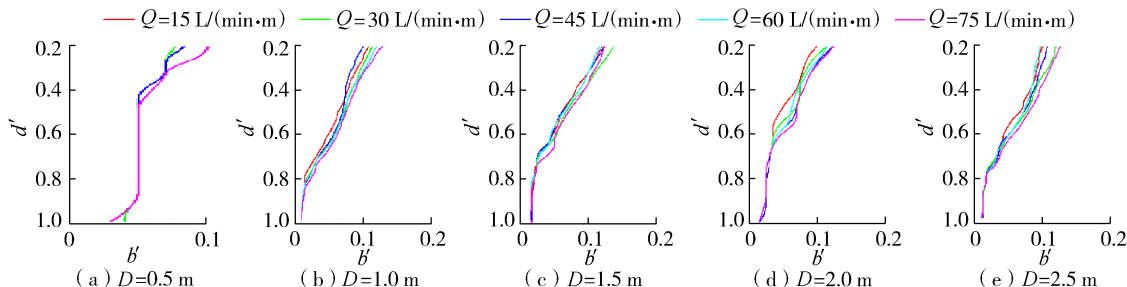


图 12 不同单宽供气量下羽流水平宽度垂向变化

大约在水深 0.4 m (即距水底 0.4 m) 处。在下层区域内, 水平宽度的垂向变化很小, 其值约为 0.025 m 。在上层区域内, 水平宽度随深度几乎呈线性变化。

3.3 水平流表层速度

根据前面环流流线图可知, 距气泡幕越远, 表层流速越小。图 13 为不同水深和单宽供气量下水平流无量纲表层速度沿程变化, 其中, $u'_0 = u_0 / \sqrt[3]{gQ}$, u_0 为水平流表层速度, $x' = x/D$ 。可以看出, 表层速

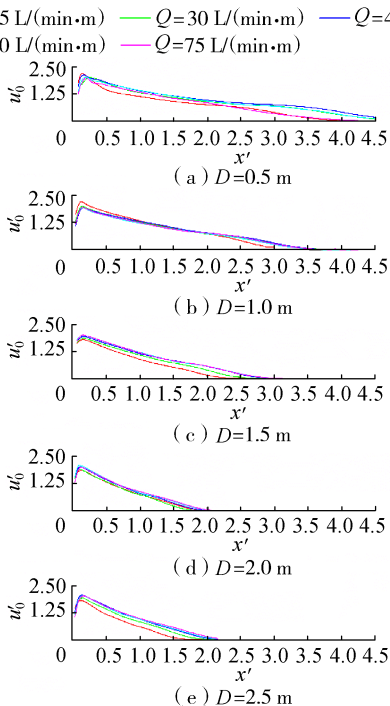


图 13 水平流表层速度沿程分布

度与单宽供气量密切相关, 最大无量纲表层速度为 2 ; 最大表层速度并不是出现在气泡幕中线上, 而是出现在距气泡幕约 0.25 倍水深处; 在此位置之外, 表层速度沿程线性减小至零。将表层流速降为零的位置定义为水平流边界, 气泡幕中心至水平流边界的距离称为水平流长度 (l_0)。水平流长度与水深有关, 水深越大, 范围越广, 水深为 0.5 m 时, 水平流长度为 2 m , 水深为 2.5 m 时, 水平流长度则为 5 m ; 水平流长度受单宽供气量的影响较小, 相同水深下, 单宽供气量增加至 5 倍后, 水平流长度增长量不超过 20% 。根据 5 个水深条件下的模拟结果, 获得水平流长度与水深之间的拟合关系为 $l_0/D = (D_0/D)^{0.532}$, 拟合度为 0.96 。

3.4 水平流厚度

图 14 为不同工况下无量纲水平流厚度沿程分布, 其中, $\delta' = \delta/D$, δ 为水平流厚度。很明显, 水平流厚度与单宽供气量无关, 水深是其决定因素。在 0.25 倍水深处, 水平流厚度最小, 约为 0.15 倍水深。此后, 水平流厚度沿程逐渐增大, 到一定值后便不再增长, 最大水平流厚度约为 0.4 倍水深。从最小厚度至最大厚度, 水平流经历的距离随水深变大而增加。本文称该距离为水平流厚度的发展长度 l_d 。根据数值模拟结果, 水平流厚度的发展长度与水深之间的拟合关系为 $l_d/D = (D_0/D)^{0.323}$, 拟合度为 0.99 。

3.5 水平动能流

气泡幕可通过逆向水平流将悬浮泥沙带离, 其

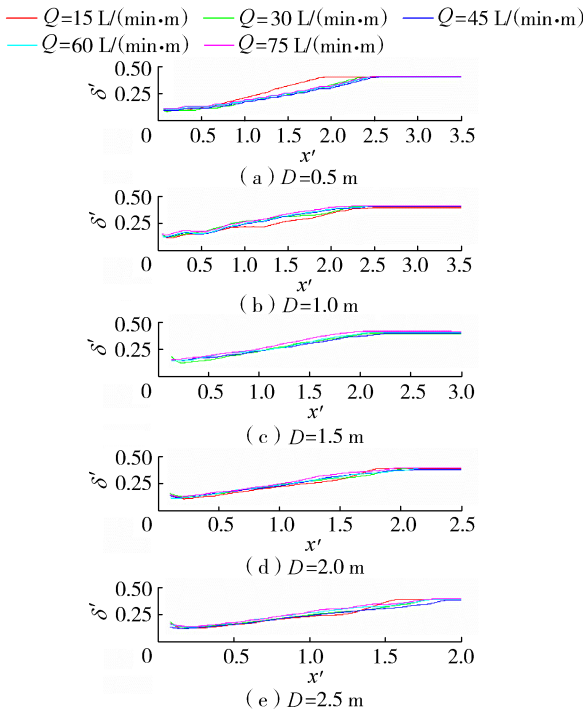


图 14 无量纲水平流厚度沿程分布

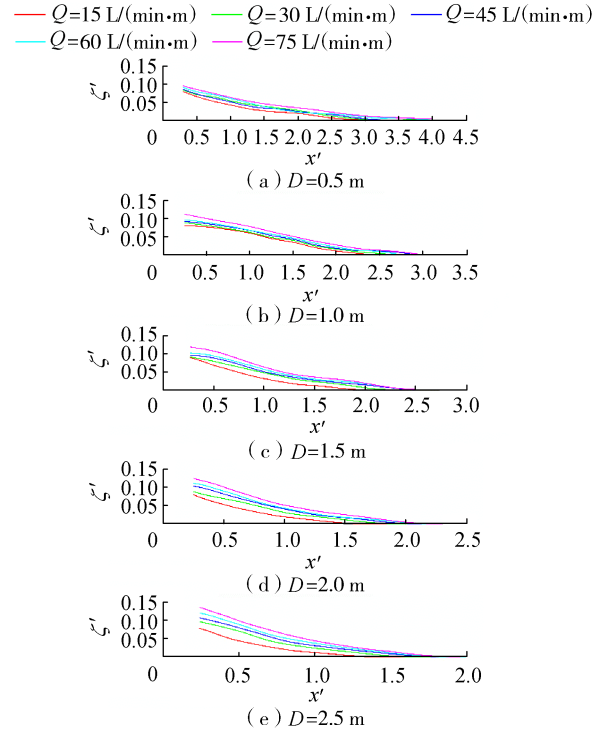


图 15 单宽体积动能流沿程分布

中,逆向水平流的单宽动能流 ξ 定义为

$$\xi = \int_{-\delta}^0 \frac{1}{2} \rho u^3 dz \quad (16)$$

进一步定义单宽体积动能为 $\zeta = \xi / \rho$, 其无量纲形式为 $\zeta' = \zeta / (gDQ)$ 。图 15 给出各种工况下无量纲单宽体积动能流沿程分布,可以看出,距气泡幕越远,单宽体积动能流越小;水平动能流大小不仅与水深密切相关,也受到单宽供气量的影响,水深越大,单宽供气量改变带来的单宽体积动能流变化越明显。当水深为 2.5 m 时,单宽供气量增长 4 倍,水平动能流增加 1 倍。假定在水平流内,水平流速沿水深呈线性分布,式(16)将简化为

$$\xi = \frac{\delta}{8} \rho u_0^3 \quad (17)$$

其无量纲形式为

$$\xi' = \frac{\xi}{gDQ} = \frac{1}{8} \delta' (u_0')^3 \quad (18)$$

简化后的结果与积分结果基本吻合。

浅水情况下,气泡幕的功率^[25]定义为

$$P = \rho g D Q_0 \quad (19)$$

定义气泡幕作用效率 $\eta = \xi / P$, 结合式(17)和(19),得

$$\eta = \frac{1}{8} \delta' (u_0')^3 \frac{D_0}{D_0 + D} \quad (20)$$

根据式(20),并结合前面的分析,可知气泡幕作用效率与距气泡幕远近密切相关,最大作用效率约为 $0.1 D_0 / (D_0 + D)$ 。

4 结 论

a. 气泡羽流的垂向速度在水平方向上呈高斯分布,表层水平流内水平速度沿水深呈线性分布。

b. 羽流中心速度沿深度的变化分为 3 个阶段,最大速度出现在 0.5 m 水深处,无量纲值约为 3;在羽流中心速度维持阶段,羽流宽度沿深度呈线性增长;在 0.2 倍水深深度处,羽流宽度为 0.12 倍水深。最大表层流速出现在 0.25 倍水深断面上,其无量纲值约为 2;在该断面外,表层流速随到气泡幕的距离线性减小;水平流长度与水深有关,具体计算公式为 $l_0/D = (D_0/D)^{0.532}$ 。水平流厚度在 0.15~0.4 倍水深之间,最大表层流速断面处水平流厚度最小。

c. 气泡幕产生的水平动能流可通过厚度与表层流速得到,若要利用气泡幕产生的水平流驱离悬沙,其作用效率不会超过 $0.1 D_0 / (D_0 + D)$ 。

参考文献:

- [1] 李俊奇,张兴宇,林聪,等. 河泥与海泥陶粒填料生物滞留设施径流控制试验[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 229-236. (LI Junqi, ZHANG Xingyu, LIN Cong, et al. Experiment on runoff control of bioretention facilities using river mud and sea mud ceramicsite as fillers [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 229-236. (in Chinese))
- [2] 王瑞彩,吴腾. 改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 93-100. (WANG Ruicai, WU Teng. Experimental

- study on the performance of solidified dredged sludge by improved municipal solid waste incineration bottom ash [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(1): 93-100. (in Chinese)
- [3] 彭剑锋, 曹文斌, 柳恒, 等. 一种组合式拦浑屏障: CN202321355601. 5[P]. 2023-09-12.
- [4] CUTRONEO L, VAN DER GOOT F, ROELS A, et al. A check on the efficiency of an air-bubble screen using acoustic measurements and an artificial tracer[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(9): 1626-1637.
- [5] 吴贵江, 侯方东, 聂小保, 等. 沉积物疏浚中气泡防淤帘对污染物扩散控制效果的研究[J]. 供水技术, 2013, 7(2): 26-30. (WU Guijiang, HOU Fangdong, NIE Xiaobao, et al. Controlling effects of air bubble screen for contaminant dispersion during sediment dredging [J]. Water Technology, 2013, 7(2): 26-30. (in Chinese))
- [6] 李智, 陈林, 陈熙宇, 等. 水流作用下气泡帘的形成及防悬浮物扩散特性[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 146-152. (LI Zhi, CHEN Lin, CHEN Xiyu, et al. Formation of bubble curtain and prevention of diffusion characteristics of suspended solids under ocean current [J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 146-152. (in Chinese))
- [7] CHENG Yixuan, ZHAO Ning, ZHANG Kaidi, et al. Research on the plume stability of air bubble curtains under low transverse flow velocity environment in dredging engineering[J]. Ocean Engineering, 2021, 232: 109133.
- [8] 常聪聪, 翟建国, 黄筱云, 等. 气泡帷幕拦浑效率试验研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(3): 196-205. (CHANG Congcong, ZHAI Jianguo, HUANG Xiaoyun, et al. An experimental study on the efficiency of bubble curtain intercepting turbid water[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(3): 196-205. (in Chinese))
- [9] XU Tiaojian, WANG Xiaorong, GUO Weijun, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic behavior of a pneumatic breakwater[J]. Ocean Engineering, 2019, 180: 108-118.
- [10] MCCLIMANS T, LEIFER I, GJØSUND S H, et al. Pneumatic oil barriers; the promise of area bubble plumes [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2013, 227(1): 22-38.
- [11] KEETELS G, UITTENBOGAARD R, CORNELISSE J, et al. Field study and supporting analysis of air curtains and other measures to reduce salinity transport through shipping locks [J]. Irrigation and Drainage, 2011, 60(Sup1): 42-50.
- [12] BADDOUR R E. Computer simulation of ice control with thermal-bubble plumes: line source configuration [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1990, 17(4): 509-513.
- [13] SAHOO G B, LUKETINA D. Bubbler design for reservoir destratification [J]. Marine and Freshwater Research, 2003, 54(3): 271-285.
- [14] SCHIERHOLZ E L, GULLIVER J S, WILHELMS S C, et al. Gas transfer from air diffusers [J]. Water Research, 2006, 40(5): 1018-1026.
- [15] FAN Wei, CHEN Jiawang, PAN Yiwen, et al. Experimental study on the performance of an air-lift pump for artificial upwelling [J]. Ocean Engineering, 2013, 59: 47-57.
- [16] LUCKE K, LEPPER P A, BLANCHET M A, et al. The use of an air bubble curtain to reduce the received sound levels for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(5): 3406-3412.
- [17] BRYSON L S, SMITH P R, MAHBOUB K C. A rational bubble screen design approach for mitigation of underwater explosion near waterborne infrastructure [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2021, 48(3): 298-311.
- [18] 范纹彤, 刘雁, 王谦, 等. 气泡幕对异齿裂腹鱼的阻拦效果[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1433-1437. (FAN Wentong, LIU Yan, WANG Qian, et al. The blocking effect of bubble curtain on *Schizothorax oconnori* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(5): 1433-1437. (in Chinese))
- [19] TAYLOR G I. The action of a surface current used as a breakwater [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1955, 231(1187): 466-478.
- [20] ABRAHAM G, BURGH P V D. Pneumatic reduction of salt intrusion through locks [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1964, 90(1): 83-119.
- [21] KOBUS H E. Analysis of the flow induced by air-bubble systems [C]//Proceedings of the 11th Coastal Engineering Conference. London: ASCE, 1968.
- [22] CEDERWALL K, DITMARS J D. Analysis of air-bubble plumes [R]. Pasadena: W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, 1970.
- [23] BREVIK I, KRISTIANSEN Ø. The flow in and around air-bubble plumes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(4): 617-634.
- [24] BULSON P S. Currents produced by an air curtain in deep water [J]. The Dock and Harbor Authority, 1961, 42: 15-22.
- [25] KURIHARA M. On the study of a pneumatic breakwater in Japan [J]. Coastal Engineering in Japan, 1965, 8(1): 71-83.
- [26] TEKELI S, MAXWELL W H C. Physical modeling of bubble screens [J]. Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, 1980, 106(1): 49-64.
- [27] TSANG G. Modelling criteria for bubble plumes: a theoretical approach [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 11(2): 293-298.

(下转第 30 页)

- of Hydraulic Engineering, 2002 (9): 100-107. (in Chinese))
- [16] 张茜,陈建生,董海洲,等. 示踪法测定井中渗透流速的广义稀释模型研究 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33 (10): 126-130. (ZHANG Qian, CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, et al. Modified generalized dilution model of determining permeability velocity in wells by tracer method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33 (10): 126-130. (in Chinese))
- [17] 叶合欣. 基于示踪剂质量守恒的测流模型研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2007, 39 (5): 26-30. (YE Hexin. Study on model of measuring seepage velocity basing on tracer mass conservation [J]. Advanced Engineering Sciences, 2007, 39 (5): 26-30. (in Chinese))
- [18] 叶合欣,陈建生,童海滨,等. 考虑示踪剂弥散作用的渗透流速计算方法 [J]. 水利学报, 2008, 39 (2): 240-244. (YE Hexin, CHEN Jiansheng, TONG Haibin, et al. Method for calculating seepage velocity in consideration of tracer dispersion effect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (2): 240-244. (in Chinese))
- [19] PITRAK M, MARES S, KOBR M. A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow [J]. Ground Water, 2007, 45 (1): 89-92.
- [20] DONG Haizhou, CHEN Jiansheng, LI Xiaoying. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 136-145.
- [21] 沈添耀,董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (2): 63-69. (SHEN Tianyao, DONG Haizhou. Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 63-69. (in Chinese))
- [22] 柴栋,方广涛,邱春雄,等. 多含水层渗流系统电导示踪模型 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (2): 70-75. (CHAI Dong, FANG Guangtao, QIU Chunxiong, et al. Electric conductivity tracer model of a multi-aquifer seepage system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 70-75. (in Chinese))
- [23] 刘国庆,洪云飞,王蔚,等. 联合示踪探测方法在石梁河水库大坝渗漏中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (6): 74-81. (LIU Guoqing, HONG Yunfei, WANG Wei, et al. Application of combined tracer detection method in dam leakage of Shilianghe Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (6): 74-81. (in Chinese))
- [24] 张申,李锦,王群敏,等. 基于贝叶斯网络的富水砂层深基坑渗漏动态风险分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (6): 60-68. (ZHANG Shen, LI Jin, WANG Qunmin, et al. Dynamic risk analysis of deep foundation pit leakage in water-rich sand layer based on Bayesian network [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 60-68. (in Chinese))
- [25] BEDMAR A P, ARAGUAS L. Detection and the prevention of leaks from dams [M]. Lisse: A A Balkema Publishers, 2002.

(收稿日期: 2024 - 11 - 21 编辑: 俞云利)

(上接第 23 页)

- [28] LEIFER I, MCCLIMANS T A, GJØSUND S H, et al. Fluid motions associated with engineered area bubble plumes [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2016, 142 (2): 04015015.
- [29] 张成兴,王永学,王国玉,等. 静水中气泡帷幕产生水平流的数值模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25 (1): 59-66. (ZHANG Chengxing, WANG Yongxue, WANG Guoyu, et al. Numerical simulation study on the horizontal current generated by air bubbles curtain in still water [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25 (1): 59-66. (in Chinese))
- [30] XU Tiaojian, WANG Xiaorong, GUO Weijun, et al. Numerical simulation of combined effect of pneumatic breakwater and submerged breakwater on wave damping [J]. Ships and Offshore Structures, 2022, 17 (2): 242-256.
- [31] 程以炫,董恒瑞,闫睿奎,等. 气泡羽流摆动特性及附壁效应研究 [J]. 高校化学工程学报, 2020, 34 (4): 904-911. (CHENG Yixuan, DONG Hengrui, YAN Ruikui, et al. Characteristics of bubble plume oscillation and the Coanda effect [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2020, 34 (4): 904-911. (in Chinese))
- [32] DHOTRE M T, SMITH B L. CFD simulation of large-scale bubble plumes: comparisons against experiments [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (23): 6615-6630.
- [33] 常聪聪,翟建国,黄筱云,等. 海船闸气幕防咸数值模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2022, 37 (1): 101-107. (CHANG Congcong, ZHAI Jianguo, HUANG Xiaoyun, et al. Numerical investigation of bubble curtain for mitigating salt intrusion through sea locks [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37 (1): 101-107. (in Chinese))
- [34] 吴凤林, TSANG G. 关于气泡羽流的研究 [J]. 水动力学研究与进展, 1989, 4 (1): 104-112. (WU Fenglin, TSANG G. On bubble plumes research [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1989, 4 (1): 104-112. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 04 编辑: 俞云利)