

# 气泡羽流流动特性研究综述

张睿, 刘文字, 徐辉, 李清, 郭天鑫, 李茜

(河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:**从理论模型、行为特征、流场特性三方面系统梳理了气泡羽流流动特性的研究进展。在理论模型方面,回顾了从早期单相羽流模型到耦合气泡群动力学、分层环境及线源效应的现代积分模型的发展历程,揭示了浮力驱动、流体卷吸、气泡滑移等关键作用机制;在行为特征方面,重点综述了气泡羽流的扩散规律、振荡特性及附壁效应的实验与数值模拟研究成果;在流场特性方面,总结了基于 PIV、PTV 等实验测量技术与数值模拟方法在揭示气泡羽流的三维速度场、湍流结构、气泡分布等精细流场信息方面的研究进展。指出气泡羽流未来的研究方向包括融合人工智能算法,引入气泡形变、聚并、破碎等复杂物理过程,深化线源气泡羽流理论模型,完善三维流场表征及提高污染物拦截预测精度。

**关键词:**气泡羽流;流动特性;行为特征;扩散特性;振荡特性;附壁效应;流场特性

**中图分类号:**O359

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2025)06-0009-10

**Review of flow characteristics of bubble plumes//ZHANG Rui, LIU Wenyu, XU Hui, LI Qing, GUO Tianxin, LI Qian**  
(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** This paper systematically reviews the research progress on the flow characteristics of bubble plumes from three aspects: theoretical models, behavioral characteristics, and flow field properties. In terms of theoretical models, it reviews the development process from early single-phase plume models to modern integral models that incorporate bubble swarm dynamics, stratified environments, and line-source effects, elucidating key mechanisms such as buoyancy-driven flow, fluid entrainment, and bubble slip. Regarding behavioral characteristics, this paper summarizes experimental and numerical simulation findings on the diffusion laws, oscillation characteristics, and wall-attachment effects of bubble plumes. For flow field properties, it reviews advances in utilizing experimental measurement techniques (e.g., PIV and PTV) and numerical simulations to reveal flow field information, including three-dimensional velocity fields, turbulent structures, and bubble distributions. It is pointed out that future research directions for bubble plumes should include integrating artificial intelligence algorithms, incorporating complex physical processes such as bubble deformation, coalescence, and breakup, deepening the theoretical models for line-source bubble plumes, improving the characterization of three-dimensional flow fields, and enhancing the prediction accuracy of pollutant interception.

**Key words:** bubble plume; flow characteristics; behavioral characteristics; diffusion characteristics; oscillation characteristics; wall-attachment effect; flow field characteristics

作为一种复杂的气液两相流动,气泡羽流是指连续气体(空气、天然气等)注入液体(水、油等)中破裂成气泡,气泡在浮力驱动下向上运动并带动周围液体一同流动,形成一种具有明显上升趋势且包含大量离散气泡的连续流动现象<sup>[1-2]</sup>。气泡羽流现象在自然界中十分常见<sup>[3]</sup>,多由天然气等气体释放或流体扰动导致空气卷入液体形成,例如:湖底、海底沉积物中有机质分解产生的甲烷等气体,以气泡形式逸出沉积物进入水体并上升至水面而形成气泡羽流<sup>[4]</sup>;海底火山喷发释放的大量二氧化碳、硫化

氢等气体,以气泡形式涌入海水形成超大规模的气泡羽流<sup>[5]</sup>;大坝泄洪或瀑布冲击水面时,高速水流将空气卷入水中产生大量的上浮气泡<sup>[6]</sup>,形成白色的气泡羽流带。借助气泡的浮力、混合作用,气泡羽流在工程领域得到了广泛应用:利用曝气产生大量气泡形成气泡羽流来打破水库的热分层或密度分层结构,进而改善水质<sup>[7-8]</sup>;通过气泡羽流实现氧气的传递与溶解,提高污水处理池内溶解氧浓度,为好氧微生物降解污染物提供必要条件<sup>[9-10]</sup>;利用气泡羽流的浮力驱动反应物颗粒运动,促进工业反应器中

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51809081)

**作者简介:**张睿(1984—),男,副教授,博士,主要从事水能开发利用研究。E-mail: gulie1984@163.com

反应物充分混合,提升整体化学反应效率<sup>[11]</sup>;借助气泡羽流驱动的上升流所引发的水面外扩流动,形成物理屏障,以阻挡泄漏石油扩散或拦截水面漂浮垃圾,从而减轻水环境污染<sup>[12-13]</sup>。此外,气泡羽流还被应用于堤坝消能防冲<sup>[14]</sup>、水面结冰预防<sup>[15]</sup>、水产养殖<sup>[16]</sup>等诸多工程领域。气泡羽流作为浮力驱动的气液两相混合流动,通过气泡与液体的相互作用实现物质传递、能量交换以及流体驱动,这一特性使其成为自然界中物质循环的载体和工程中高效的过程调控工具。因此,研究气泡羽流的流动特性,对于提高气泡羽流的功能效果及实现工程应用中的节能降耗具有重要意义。

气泡羽流的理论模型是揭示其流动规律的基础,行为特征是表征其流动特性的外在体现,流场特性是理解其内部复杂机理的关键。因此,本文从理论模型、行为特征、流场特性三方面综述气泡羽流流动特性的研究进展,并对气泡羽流未来研究方向进行展望。

## 1 气泡羽流理论模型研究

根据动力学特性差异,气泡羽流可被划分为射流区、浮力羽流区、表面流动区三部分<sup>[17]</sup>。为研究气泡羽流的流动特性,获取其流场信息及相关水力学特征参数,研究者采用积分方法构建了半经验式理论模型,即积分模型,用于预测气泡羽流的流动特征。

早期,积分模型研究主要聚焦于均匀环境下的气泡羽流,重点分析其形成过程,并量化其直径、速度等参数。Morton 等<sup>[18]</sup>依据卷吸假设,仅考虑浮力驱动与环境流体卷吸,最早提出了单相羽流积分模型,该模型能够描述低气泡浓度下气泡羽流的运动。Kobus<sup>[19]</sup>在对静止均匀环境中的气泡羽流流动特性进行积分分析时,假定气泡羽流的速度分布和密度衰减分布具有相似性且均符合高斯分布,构建了三维气泡羽流中心轴线上平均速度、体积流率和动量流率的计算方程。由于 Kobus 模型仅考虑了浮力对气泡上升时动量变化的影响,因此该模型仅适用于浮力羽流区内的流动特性分析<sup>[20-21]</sup>。Ditmars 等<sup>[22]</sup>考虑气泡相对于羽流运动的滑移效应以及气泡膨胀引起的浮力变化等影响,对 Morton 等提出的单相羽流积分模型进行改进,提出了点源(单个气泡发生源)和线源(线性分布多个气泡发生源)气泡羽流的归一化控制方程的广义解,该解能够有效预测气泡羽流中心轴线上的速度与横向扩散特性。Fanneløp 等<sup>[23]</sup>考虑浮力变化对卷吸系数等参数的影响以及羽流与自由液面的交互作用,构建了适用于预测深水油气泄漏的气泡羽流模型。槐文信等<sup>[24]</sup>探讨了

气泡羽流的自相似性,指出静水环境中气泡羽流满足自相似性的条件为韦伯数小于  $10^2$ ,同时给出了气泡在气液混合流中的滑移流速计算公式,且发现滑移速度基本维持在  $26.8 \sim 30 \text{ cm/s}$ 。

由于弱气泡羽流卷吸作用弱、传质能力低、携带的质量与动量有限,因而有别于常规气泡羽流。为有效预测弱气泡羽流的直径、扩散率等物理特征,Wang 等<sup>[25]</sup>假设弱气泡羽流的速度与含气率的横向分布均符合高斯分布,构建了静水环境中弱气泡羽流的行为预测模型。

在自然界中,气泡羽流更普遍存在于分层环境水体中,而非均匀环境。在分层环境中,气泡羽流携带的高密度气液混合物上升至低密度层时会发生坍塌,形成水平侵入体。为探究分层环境中气泡羽流的流动特性,McDougall<sup>[26]</sup>将 Ditmars 模型应用于分层环境流体中,探究了分层环境下气体膨胀与气泡滑移速度的变化规律,提出了一种双羽流模型,即将羽流划分成俯视为圆形的内羽流和环形的环羽流两个独立且相互作用的部分。该模型考虑了环境流体与内、外羽流之间的相互作用及内、外羽流之间的流体交换过程,假定速度、浮力剖面均为平顶剖面,且内羽流的浮力完全由气泡运动提供。Baines 等<sup>[27]</sup>假定分层环境液体的密度分布不随时间变化,推导了线性分层环境的中层浮力通量的关系式,并定义了无量纲参数,用于区分羽流的结构差异。Socolofsky 等<sup>[28]</sup>假定内外羽流分离且忽略气泡形变,考虑密度分层环境中羽流剥离与侵入体形成,提出了一种基于双羽流方法的分层环境下多相羽流的广义积分模型。该模型能够有效预测羽流上升最大深度、气泡完全溶解位置、减速羽流最大高度以及侵入体体积通量等。王少雄等<sup>[29]</sup>基于积分模型,引入静水压力恒定、喷泉底部动能能够完全转化为势能等假定,求解了轴向速度、轴线空隙率和喷泉高度峰值,构建了气泡羽流的喷泉高度分布预测模型,发现气泡羽流轴向速度随水深增加而降低,喷泉高度峰值与气体流速呈正相关。Bohne 等<sup>[30]</sup>提出了一种耦合气泡群动力学的浮力羽流积分模型,该模型采用轴向积分将控制方程组简化为仅含轴向坐标的一维方程,简化了多相流与气泡演化之间的复杂耦合过程,实现了高效计算,可用于预测气泡幕中气泡尺寸分布及声学特性。

为准确预测分层环境中线源气泡羽流的侵入过程、混合模式及效率,Dissanayake 等<sup>[31]</sup>基于点源双羽流积分模型,考虑密度分层的影响,采用连续剥离方法,将羽流分为内羽流(上升气泡与卷吸液体)和外羽流(因密度分层减速而脱离内羽流的液体)两

部分,假设羽流截面上的速度和浮力为均匀分布,结合动量守恒方程,构建了适用于线源气泡羽流的连续剥离双羽流积分模型,并通过与水库实测数据对比,验证了该模型的准确性。Beelen 等<sup>[32]</sup>为简化线源气泡羽流的计算与描述,通过定义对称域实现相邻点源气泡羽流的光滑过渡,从而统一描述了点源气泡羽流(射流区)、羽流合并过程(浮力羽流区)和线源气泡羽流(表面流动区);在此基础上,他们借鉴 Bohne 等提出的耦合气泡群动力学的浮力羽流积分模型,采用积分方法,结合动量守恒、质量守恒及气泡动力学特性,分析了气泡幕全区域的流动特性,有效预测了线源气泡羽流的空隙率、气泡尺寸分布及过渡特性。

## 2 气泡羽流行为特征研究

气泡羽流的行为特征是其流动特性的外在表现,当前国内外学者基于实验测量与数值模拟方法,围绕气泡羽流的扩散特性、振荡特性及附壁效应等行为特征开展了广泛研究。

### 2.1 气泡羽流的扩散特性

气泡羽流的扩散特性反映了气泡羽流上升过程中,其直径、扩散角及气泡尺寸等参数的变化规律。Wang 等<sup>[33]</sup>采用高速摄影实验研究了水下气体泄漏引发的气泡羽流扩散特性及喷泉效应,分析了不同泄漏条件(泄漏压力、喷嘴直径)对气泡羽流直径、扩散角、喷泉高度等特征参数的影响,发现气泡羽流直径与喷嘴直径呈正相关,当泄漏压力低于临界值(0.3 MPa)时,气泡羽流直径随泄漏压力的增大而增大,但当泄漏压力超过临界值后,气泡羽流直径增幅趋于平缓;同时,该研究还构建了气泡羽流最大喷泉高度的预测模型。Oliveira 等<sup>[34]</sup>基于 VOF 方法<sup>[35]</sup>构建了二维气液两相流模型,研究了水下气体泄漏所形成的气泡羽流的上升特性,发现气泡羽流的水平扩散特性受泄漏雷诺数影响,并构建了气泡簇特征半径与泄漏雷诺数之间的关系式。Li 等<sup>[36]</sup>通过高速摄影实验探究了静水中气泡羽流的扩散特性及喷泉行为,分析了供气压力、流量和气体释放深度对喷泉高度的影响,研究表明,气泡羽流在上升过程中会逐渐扩散形成倒锥形,且伴随气泡聚并与破裂现象;喷泉高度与供气压力、流量呈正相关,与气体释放深度呈负相关,喷泉高度在水平方向上符合高斯分布。

在分层环境中气泡羽流扩散特性研究方面,Lima 等<sup>[37]</sup>通过实验研究了气泡羽流在两层不同密度的环境流体中上升时对密度界面的混合作用,发现在下层流体中,羽流速度超过气泡上升速度,符合

经典湍流浮力羽流理论;当羽流进入上层流体后,若羽流呈负浮力则形成喷泉,喷泉上升有限距离后坍塌,形成中间密度层,且喷泉上升高度与弗劳德数( $1 < Fr < 7$ )的平方成正比,上层流体卷吸率与喷泉高度成正比。Sigurðardóttir 等<sup>[38]</sup>围绕线性密度分层液体中湍流轴对称气泡羽流的扩散特性展开研究,结果表明,气泡羽流向上运动过程中,早期形成多个侵入体并呈放射状扩散;环境液体在侵入体周围被卷吸进入羽流,侵入体到达水箱边壁后重新卷入羽流,最终充满整个水箱。Murai 等<sup>[39]</sup>研究了密度分层环境下气泡羽流的水平侵入机制及演化过程,发现羽流中的气泡会携带下层重流体上升,与上层轻流体混合形成中间密度层,中间密度层的羽流在重力驱动下沿水平方向扩散,逐渐扩散至整个流体区域,最终实现全域均质化。

### 2.2 气泡羽流的振荡特性及附壁效应

气泡羽流的振荡特性是指气泡群上升时呈现的周期性或准周期性动态行为,通常表现为侧向摆动、纵向脉冲、界面波动及气泡群的聚并-破裂循环等,其频率、振幅受气体流量、流体性质及环境约束等因素影响<sup>[40]</sup>。当气泡羽流处于受限空间时,受临近壁面的限制,气泡羽流与壁面间形成低压区,驱动气泡羽流向壁面偏移并贴壁爬升,进而产生附壁效应(康达效应)<sup>[41]</sup>,导致形态扭曲、扩散受限,从而改变振荡的频率、振幅及稳定性。气泡羽流的振荡特性及附壁效应均源于气泡与流体的相互作用,二者共同影响气泡羽流的稳定性和工程性能,导致气泡羽流的形态畸变、动力学参数(如速度)改变及混合效率受限<sup>[42]</sup>。

为探究气泡羽流振荡特性及附壁效应,已有学者开展了系列实验研究。Alam 等<sup>[43]</sup>研究了平面层流气泡羽流的振荡特性,发现羽流先呈蜿蜒振荡,随后因离散涡的形成而转变为湍流;转变高度与最不稳定扰动波长呈线性关系,波速约为平均羽流中心速度的 40%;初始振荡阶段羽流呈二维特性,过渡后期则表现出三维性,且平面气泡羽流比空气中的平面热羽流更易因振荡而失稳。Julia 等<sup>[44]</sup>采用线性判别分析技术(linear discriminant analysis, LDA)及粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)开展了矩形鼓泡塔中气泡羽流流动结构的实验测量,发现气泡羽流振荡现象的出现与曝气宽度与塔宽之比相关,当曝气宽度与塔宽之比低于 0.6 时,气泡羽流会出现振荡现象,且其振荡频率随表观气速增大而增大。Liu 等<sup>[45]</sup>对矩形鼓泡塔中气泡羽流的振荡行为进行了实验研究,分析发现:液体深度与塔宽之比(纵横比)从 1.375 增大至 2.0 时,气泡

羽流的振荡频率显著增大,纵横比大于 2.5 时,振荡频率基本不变;而曝气宽度、气孔尺寸、液体黏度对气泡羽流的振荡频率无显著影响。Laupsien 等<sup>[46]</sup>采用 PIV 技术、阴影图技术、光纤探针等方法,针对低空隙率气泡羽流的振荡特性开展实验研究,分析其周期性振荡及诱导的大尺度相干结构,发现气泡羽流的振荡周期为 15~30 s,通过相位平均和本征正交分解(POD)分析可知,POD 前 3 阶模态贡献 90% 能量,且可重构主要流动特征。

除实验方法外,数值模拟方法也常用于研究气泡羽流振荡特性。Buwa 等<sup>[47]</sup>采用欧拉-拉格朗日方法模拟研究了矩形鼓泡塔中三维非稳态气泡羽流的振荡特性,分析了表观气速、纵横比等参数对气泡羽流振荡特性的影响,发现所采用的方法可有效捕捉气泡羽流的低频振荡特征,且与实验测量结果及欧拉-欧拉方法模拟结果吻合良好。Fleck 等<sup>[48]</sup>采用非定常雷诺平均模拟(URANS)方法<sup>[49]</sup>耦合欧拉-欧拉双流体模型研究了气泡羽流的周期性振荡流动,结果表明模拟的羽流振荡周期、时均相速度及相分数与 Buwa 等<sup>[47]</sup>的实验结果总体吻合良好。马霞等<sup>[50]</sup>采用三维欧拉-欧拉方法结合标准  $k-\varepsilon$  湍流模型,探究了不同纵横比和气体流量下矩形鼓泡塔内低空隙率平面气泡羽流的瞬时流动特性,发现当纵横比为 1.0 时,气泡羽流的流动形态和结构稳定,当纵横比为 2.25 和 3.0 时,气泡羽流受垂向不稳定旋涡诱发,出现周期性摆动,且随着气体流量增加,摆动频率加快并趋于稳定。Cheng 等<sup>[51]</sup>采用欧拉-欧拉方法研究了气泡羽流的偏移特性,发现气泡呈螺旋状向顶域出口流动,从最大偏移位置的高度面开始,偏移特性在各截面上呈周期性波动且与羽流振荡周期同步。此外,Cheng 等<sup>[52]</sup>还研究了疏浚工程低横向流速环境下气泡幕的稳定性,发现单孔线源气泡羽流在上升运动中会出现振荡和偏移现象,在横向流中更易失稳,导致气泡幕无法阻隔悬浮物扩散;而在双孔线源气泡羽流模型下,气泡羽流的融合与迁移受横向流速、孔间距和气流等因素影响呈现时变特性,气泡羽流融合前左侧气泡流迁移更明显,融合后呈凹形,且气泡羽流稳定性受韦伯数影响较大,孔间距和气流分别影响融合高度和迁移特性。

针对气泡羽流的附壁效应研究,Freire 等<sup>[53]</sup>发现,气泡羽流靠近壁面或相邻气泡羽流时会发生弯曲,这是由相邻壁面或气泡羽流导致的卷吸受限引发的动量通量不平衡引起,气泡羽流的弯曲偏转轨迹近似直线,且含气率不再服从高斯分布,偏转角度与弗劳德数和韦伯数呈正相关关系。肖柏青等<sup>[54]</sup>通过曝气池模型试验,研究了附壁效应下气泡羽流

的偏移规律,分析得出气泡羽流的倾斜程度主要受曝气盘距边壁的距离(盘壁距离)和通气量影响,受水深影响不显著,倾斜角度随盘壁距离增加而减小,随通气量增加呈线性增大。程以炫等<sup>[55]</sup>采用 VOF 方法模拟水槽内气泡羽流的生成和上升过程,研究了通气速度、孔口直径和水槽高宽比对气泡羽流振荡特性及偏移程度的影响,发现气泡羽流振荡的最大偏移量与弗劳德数和水槽宽高比呈指数衰减关系,最大偏移量对应的偏移角度与弗劳德数和水槽宽高比呈多项式关系,垂直上升、单侧摆动、蛇形摆动、附壁上升 4 类气泡上升方式与水槽高宽比相关。

### 3 气泡羽流流场特性研究

国内外学者通过对气泡羽流的速度场、旋涡结构及气泡时空分布等流场信息的系统分析,揭示了气泡羽流内部复杂流动现象的机理,不仅为气泡羽流流动特性理论模型的构建与参数校准提供定量数据支撑,还为气泡羽流的工程应用提供重要的理论依据。

#### 3.1 气泡羽流流场特性实验研究

在实验研究方面,学者们采用 PIV、粒子跟踪测速(particle tracking velocimetry, PTV)以及高速摄影等方法对气泡羽流中气泡的运动特点(如气泡运动规律、尺寸分布等)以及气泡羽流的运动特征(如速度场、漩涡结构等)展开研究。例如:Mantripragada 等<sup>[56]</sup>采用 PTV 技术研究了浮力气泡羽流的形态与流动行为,发现气泡的无量纲等效直径呈对数正态分布,纵横比呈正态分布,轴向速度在低雷诺数下呈单峰分布、高雷诺数下呈双峰分布;高雷诺数下的气泡聚并、破裂现象比低雷诺数时更显著。Abdulmouti 等<sup>[57]</sup>采用 PIV 技术研究了气泡羽流的流场特性,发现液体温度、气泡大小和气体流量显著影响气泡羽流的流场结构与气泡参数,其中气泡大小和速度随其接近自由表面而增大,水温每升高 10℃,气泡直径增加约 1mm,气泡平均速度随水深增加而增大,浮力羽流区及表流区的气泡速度分别约为初始速度的 1.5 倍和 2 倍。Behzadipour 等<sup>[58]</sup>探究了气泡羽流中气泡的动力学特性,发现时均气泡速度、气泡发生频率均与气体流量呈非线性相关,时均气泡浓度与气体流量呈线性相关,在羽流中心线上的气泡速度波动幅度随距离喷嘴高度的增加呈非线性增大,但与气体流量无相关性。Thaker 等<sup>[59]</sup>通过 PIV 和平面激光诱导荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)技术,研究了炼钢浅容器中多点源气泡羽流在不同布置方式及气体流量下的动力学特性及其在液相混合中的作用,结果表明,均匀布置

时湍动能主要集中于羽流区域,且随羽流间距增大而分散性降低;相较于均匀布置,差分布置时振荡频率显著提高,且振荡方向更复杂,从而能更有效地提升浅容器内的液相混合效率。Wu 等<sup>[60]</sup>采用 PIV 技术探究了气泡尺寸及数量对静水中气泡羽流湍流特性的影响,发现由密集小气泡形成的羽流,其中心线速度沿垂直方向递减;由少量大气泡形成的羽流,气泡核心更紧密,中心线速度几乎恒定,且其中心线区域的湍流应力显著高于小气泡羽流。此外,Wu 等<sup>[61]</sup>还探究了气泡羽流中湍动能的生成、传输和耗散机制,发现气泡羽流存在逆能量级联,即湍动能从小尺度涡旋向大尺度涡旋转移,大尺度运动的垂直速度呈偏态分布、水平速度接近高斯分布,小尺度运动的速度均接近高斯分布,涡量场中的大尺度运动形成垂直拉长的涡旋对列,而小尺度涡在水平与垂直方向上的尺寸相似。Laupsien 等<sup>[62]</sup>采用 PIV、光学探针等技术,结合膜式和段塞流管式两种分布器,开展了液体黏度和气泡尺寸分布对气泡羽流流场特性的实验研究,发现液体黏度显著抑制羽流振荡,膜式分布器的羽流振荡周期受黏度影响,而段塞流管式分布器的基本不变,两种分布器的羽流扩张均随黏度增大而减小,气泡尺寸分布影响气相扩散,但对液相流动影响较小,液相动力学受分布器类型影响较弱,且表面张力对其影响甚微。

当多个点源气泡羽流群线性排列时,可形成气泡幕结构,气泡幕在工程中多用于拦截水面漂浮物。Zhang 等<sup>[63]</sup>在气泡幕拦截漂浮塑料的实验中发现,在动水环境中气泡幕会沿水流方向弯曲,且弯曲程度随环境弗劳德数的增加而加剧。Spaargaren<sup>[64]</sup>通过气泡幕拦截漂浮物实验,探究了不同环境流速、气体流量及管道与横流方向夹角下气泡幕的拦截性能,发现气泡幕引起的水平流速变化在表层最强,水平流速从气泡幕边缘向两侧逐渐衰减,垂直流速在羽流中心处最大,且向两侧呈高斯分布衰减。Lu 等<sup>[65]</sup>基于气泡幕抑制溢油扩散实验,分析了气泡幕的流场特性,发现气泡在浮力作用下上升,带动水流向上运动,在水面形成与来流反向的流动,从而有效抑制溢油扩散。Leifer 等<sup>[66]</sup>通过大型水槽试验研究了由多个线源气泡羽流所构成的区域气泡羽流的流场特性,发现与线源气泡羽流相比,区域气泡羽流具有更厚且稳健的外流和更小的湍流尺度,近水面再循环涡流是影响水流与气泡羽流相互作用的关键,为优化气泡羽流在海洋工程溢油控制中的应用提供了有益参考。

### 3.2 气泡羽流流场特性数值模拟研究

相较于实验,数值模拟方法在气泡羽流研究中

能够以较低成本获取全流场三维细节,可开展多参数耦合分析、瞬态演变模拟、参数化研究及微观机理探究。在气泡羽流流场特性的数值模拟研究中,常用的多相流模型主要包括欧拉-欧拉模型和欧拉-拉格朗日模型。欧拉-欧拉模型将气液两相均视为连续介质,能够有效捕捉高含气率条件下气泡羽流的整体形态,且计算效率高,但无法刻画羽流中气泡的聚并、破裂等运动过程;欧拉-拉格朗日模型将气泡视为离散相、液体视为连续相,能够精确追踪各气泡的运动轨迹,但计算成本高,适用于低含气率条件。

为探究气泡羽流的流场特性,部分研究人员采用数值模拟方法开展了相关研究。Deen 等<sup>[67]</sup>采用欧拉-欧拉模型对鼓泡塔内气泡羽流进行了数值模拟,分析了曳力、升力和虚拟质量力等界面力对模拟结果的影响,通过对比分析发现,大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 方法能捕捉实验中观察到的瞬态行为,且其预测的平均速度和速度脉动与实验数据的吻合度明显优于 RANS 方法。Fraga 等<sup>[68]</sup>通过 LES 与欧拉-拉格朗日模型,研究了气泡尺寸、喷嘴直径和气体流量对气泡羽流中心线速度、动量通量等参数的影响,发现直径小于 1 mm 的气泡形成窄羽流,其中心液相速度高且羽流摆动明显,而直径大于 4 mm 的气泡形成宽羽流,其速度分布均匀且数值较低;喷嘴直径越大,喷嘴附近区域的径向湍流强度越高。Olsen 等<sup>[69]</sup>提出了一种基于  $k-\varepsilon$  模型的超大涡模拟 (very large eddy simulation, VLES) 方法,并将其与欧拉-拉格朗日方法耦合,用于模拟气泡羽流的流场特性,结果表明相较于  $k-\varepsilon$  模型,VLES 方法在仅小幅增加计算成本的前提下,可捕捉更丰富的非稳态、多尺度湍流结构,且对羽流扩散特性的预测结果与实验数据的一致性更好。Xiao 等<sup>[70]</sup>将欧拉-欧拉模型与 LES 方法耦合,研究了线性密度分层水中存在均匀横流时气泡驱动羽流的特性及物质输运规律,发现气泡与分层水的相互作用形成一种双羽流结构,即上升的气液混合羽流和因分层效应剥离的下降羽流,横流不仅会促使上升羽流倾斜和下降羽流向下游迁移,还会对物质输运产生显著影响,横流对侵入层高度的影响会因气泡上升速度的不同而存在差异。Dong 等<sup>[71]</sup>采用实验与数值模拟相结合的方法,探究了幂律流体中气泡羽流的湍流特性,分析了液相流变性和表观气速对气泡羽流的液相速度、剪切应力、湍动能、湍流尺度及含气率的影响,结果表明,在气泡羽流的生成、发展及与自由表面相互作用的各个阶段,其液相速度、剪切应力和湍动能均呈环形分布;CMC 水溶液中的平均剪切应力是水的 31~50 倍,平均湍动能是水的 1.4~2 倍;含气率随

液相浓度升高而降低,随表观风速增大而增大,且表观风速和液相流变特性通过影响相间质量与动量传递显著改变气泡羽流的流型。Espinoza<sup>[72]</sup>采用URANS方法结合欧拉-欧拉模型对气泡羽流流场进行了模拟,并分别运用POD和动态模态分解(DMD)方法对气泡羽流流场进行模态分解,POD分析发现液相前3阶模态约占系统总动能的80%,气相前3阶模态约占总动能的70%,这些主导模态表征了羽流振荡、大尺度涡旋等周期性运动结构;DMD分析也得出了类似结论,证实了其能有效识别液相和气相的大尺度涡等低频主导结构。

针对气泡幕流场特性的数值模拟研究中,李智<sup>[73]</sup>采用CFD模型模拟了气泡生成、上升及防污过程,分析了不同工况下气泡幕对悬浮物扩散的抑制性能,发现随水流速度增大,颗粒通过率上升,增大气泡孔直径和气体注入速度,可减少通过气泡幕的颗粒数,从而增强其防扩散能力。Santos等<sup>[74]</sup>采用VOF-DPM耦合方法,并结合颗粒单相耦合策略,探究了气泡幕对微塑料动力学特性的影响,结果表明,随水流速度与气体注入速度的比值增大,气泡幕下游的气泡偏转程度越大,气泡到达水面的位置越靠后,导致其拦截微塑料的效率越低。Hazar等<sup>[75]</sup>采用VOF方法与SST  $k-\omega$ 湍流模型,研究了矩形静止水体内气泡幕的防溢油性能,并结合实地试验与平均绝对百分比误差(MAPE)分析,验证了气泡幕在防溢油应用中的可行性,指出气体流量通过改变流场显著影响气泡幕的防溢油效率,且其影响效果最为显著。赵文彬等<sup>[76]</sup>基于双流体模型对气泡幕的水动力特性进行了数值模拟研究,发现气泡幕流场的垂向速度在水平方向上呈高斯分布,最大表层流速出现在距气泡幕约0.25倍水深处,气泡幕诱导的涡旋主要集中在气泡羽流区域,且单宽供气量越大,涡量值越高。

近年来,人工智能正以前所未有的速度渗透到传统科学与工程领域<sup>[77-78]</sup>,有效提升流体仿真效率,并解决传统方法难以攻克的复杂流动问题。借助深度学习、机器学习等先进算法,能实现对气泡羽流等气液两相流状态的精准识别与参数测量。杨雪等<sup>[79]</sup>通过级联深度卷积网络将速度场估计转化为回归问题,结合  $k-\epsilon$  双方程模型和积分离散技术,分析了压强、空隙率对气泡羽流漩涡结构与紊动强度的影响规律,结果显示,压强增加使羽流运动速度明显增大、漩涡结构更显著,纵横比提升会降低总紊动强度且促进两侧漩涡形成,空隙率增大则会提升总紊动强度;在相同压强条件下,瞬时羽流分布呈曲线特征,时均羽流分布均匀,且沿中心线向两边扩散。

Yang等<sup>[80]</sup>提出多特征融合识别算法,利用双通道CNN分别提取原始光学图像与NSCT低频图像的形态-纹理特征,通过自适应权重融合和ROI掩膜增强目标显著性,显著提升了复杂环境下气泡羽流的识别精度。

## 4 研究展望

a. 在理论模型方面,现有积分模型研究主要聚焦于点源气泡羽流,针对复杂线源气泡羽流的理论模型研究较为薄弱,而工程中广泛应用的气泡幕则由线源气泡羽流构成,导致理论与工程应用之间存在脱节。此外,当前积分模型中将气泡视为理想球形,采用等效气泡直径替代实际气泡参数,导致计算结果存在一定的失真。因此,未来研究需要在现有模型基础上引入气泡形变、破碎、聚并等物理过程,构建更为精确的线源气泡羽流积分模型。

b. 在行为特征方面,当前气泡羽流行为特性研究多聚焦于点源气泡羽流,针对线源气泡羽流行为特性的研究仍显不足。点源气泡羽流在上升过程中会发生扩散与振荡,当靠近壁面或相邻气泡羽流时还会发生弯曲,且附壁效应会影响气泡羽流的振荡特性;而线源气泡羽流的行为特征并非多个点源气泡羽流行为特征的简单叠加。因此,未来亟须深入探究线源气泡羽流的扩散、振荡等行为特征。

c. 在流场特性方面,实验研究需要突破二维简化局限,结合高精度气泡识别与追踪技术,同步捕捉线源气泡羽流的三维流场与气泡破裂、聚并的动态过程,揭示多尺度涡旋与气泡运动之间的耦合机制,尤其需关注分层环境、横向流等复杂条件下的流场演变。数值模拟研究需进一步优化多相流模型,提升对气泡群协同运动及湍流调制效应的仿真精度。此外,需融合深度学习(如CNN、LSTM等)与机器学习算法,以PIV/PTV实测及数值模拟等方法获得的流场与形态信息(包含气泡羽流的流速及气泡直径、扩散角等形态参数)为训练集,构建气泡羽流形态参数、速度场与气泡幕拦截效能之间的映射模型,实现气泡幕中复杂流场特性的快速预测,为气泡幕工程应用的优化设计提供理论支撑与技术参考。

## 参考文献:

[1] CARDOSO S S S, CARTWRIGHT J H E. Bubble plumes in nature[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2024, 56(1): 295-317.

[2] 宋策,程文,胡保卫,等. 气泡羽流空隙率的计算及其不稳定规律的研究[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 419-424.

(SONG Ce, CHENG Wen, HU Baowei, et al. Research on

- the calculation of void fraction of bubble plume and its instability pattern[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(4):419-424. (in Chinese))
- [3] LI Geng, WANG Binbin, WU Huijie, et al. Impact of bubble size on the integral characteristics of bubble plumes in quiescent and unstratified water [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 125: 103230.
- [4] MCGINNIS D F, LORKE A, WÜEST A, et al. Interaction between a bubble plume and the near field in a stratified lake [J]. Water Resources Research, 2004, 40 ( 10 ): W10206.
- [5] SKARKE A, RUPPEL C, KODIS M, et al. Widespread methane leakage from the sea floor on the northern US Atlantic margin[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(9):657-661.
- [6] 付小莉,付世龙,张斌,等. 总溶解气体过饱和削减措施及其评价体系研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53 ( 3 ): 50-58. ( FU Xiaoli, FU Shilong, ZHANG Bin, et al. Research progress on abatement measures for total dissolved gas supersaturation and their evaluation system [J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2025, 53(3):50-58. (in Chinese) )
- [7] SHIAU B S. Experimental observations on bubble plume in the linearly stratified density of water with a cross flow [R]. Keelung: National Taiwan Ocean University, 2001.
- [8] 陈铂,彭梦辉,王华. 静态温度分层水体中点源羽流云团垂向运动规律[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 ( 1 ): 37-41. ( CHEN Bo, PENG Menghui, WANG Hua. Vertical motion characteristics of thermal in static thermal-stratified water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):37-41. (in Chinese) )
- [9] 董鑫,李永强,曾倩,等. 微曝氧化沟气泡羽流氧输运特性研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2019, 31 ( 2 ): 19-26. ( DONG Xin, LI Yongqiang, ZENG Qian, et al. Research on oxygen transfer characteristics of bubble plumes in micro-oxidation ditch[J]. Journal of Changzhou University ( Natural Science Edition ), 2019, 31 ( 2 ): 19-26. (in Chinese) )
- [10] 王云云,刘盛赞,杨慧霞,等. 曝气对过饱和溶解氧消散过程影响的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 ( 6 ): 30-37. ( WANG Yunyun, LIU Shengyun, YANG Huixia, et al. Experimental study on effect of aeration on dissipation process of supersaturated dissolved oxygen [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6):30-37. (in Chinese) )
- [11] 魏文泽. 微曝氧化沟气泡羽流传质与脱氮性能研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- [12] 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) )
- [13] 舒颖,冯曦,白洋,等. 波浪作用下弱惯性塑料颗粒的运动特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 135-142. ( SHU Ying, FENG Xi, BAI Yang, et al. Motion characteristics of weakly inertial plastic particles under wave action [J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2025, 53(4):135-142. (in Chinese) )
- [14] 潘青青,伍骏. 气泡羽流的研究进展和应用[J]. 海洋预报, 2019, 36 ( 2 ): 97-104. ( PAN Qingqing, WU Jun. A review on the research status of bubble plume and its applications[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(2):97-104. (in Chinese) )
- [15] 李灿苹,尤加春,朱文娟. 气泡羽状流的识别及其与资源环境相关性分析 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31 ( 6 ): 2747-2755. ( LI Canping, YOU Jiachun, ZHU Wenjuan. Identification of bubble plumes and analysis of its correlation with resource environment [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6):2747-2755. (in Chinese) )
- [16] HABERLIN D, MCALLEN R, DOYLE T K. Field and flume tank experiments investigating the efficacy of a bubble curtain to keep harmful jellyfish out of finfish pens [J]. Aquaculture, 2021, 531:735915.
- [17] EINARSRUD K E, BREVIK I. Kinetic energy approach to dissolving axisymmetric multiphase plumes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135( 12 ): 1041-1051.
- [18] MORTON B R, TAYLOR G I, TURNER J S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources [J]. Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1956, 234( 1196 ): 1-23.
- [19] KOBUS H E. Analysis of the flow induced by air-bubble systems [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Coastal Engineering. New York: American Society of Civil Engineers, United Engineering Center, 1968:1016-1031.
- [20] 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]. Journal of Hydrodynamics, 1989, 4(1):104-112. (in Chinese) )
- [21] 吴凤林, TSANG G. 三维气泡羽流的 Kobus 理论的扩展与评判 [J]. 力学学报, 1990, 22 ( 6 ): 641-651. ( WU Fenglin, TSANG G. Extension and examination of Kobus theory for three-dimensional bubble plume [J]. Acta Mechanica Sinica, 1990, 22(6):641-651. (in Chinese) )
- [22] DITMARS J D, CEDERWALL K. Analysis of air-bubble plumes [C]//Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering. New York: American Society of Civil Engineers, United Engineering Center, 1974:2209-2226.

- [23] FANNELØP T, SJØEN K. Hydrodynamics of underwater blowouts [C]//Proceedings of the 18th Aerospace Sciences Meeting, Pasadena: AIAA, 1980: 1-45.
- [24] 槐文信,童汉毅,邹东明. 关于气泡羽流积分模型中的两个问题[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(3): 1-4. (HUAI Wenxin, TONG Hanyi, ZOU Dongming. On two problem of integral model for bubble plumes[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 2000, 33(3): 1-4. (in Chinese))
- [25] WANG Binbin, LAI C C K, SOCOLOFSKY S A. Mean velocity, spreading and entrainment characteristics of weak bubble plumes in unstratified and stationary water [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 874: 102-130.
- [26] MCDOUGALL T J. Bubble plumes in stratified environments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 85(4): 655-672.
- [27] BAINES W D, LEITCH A M. Destruction of stratification by bubble plume[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(4): 559-577.
- [28] SOCOLOFSKY S A, BHAUMIK T, SEOL D G. Double-plume integral models for near-field mixing in multiphase plumes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(6): 772-783.
- [29] 王少雄,李玉星,刘翠伟,等. 水下输气管道泄漏扩散特性模拟研究[J]. 化工学报, 2020, 71(4): 1898-1911. (WANG Shaoxiong, LI Yuxing, LIU Cuiwei, et al. Numerical simulation on leakage and diffusion characteristics of underwater gas pipeline [J]. CIESC Journal, 2020, 71(4): 1898-1911. (in Chinese))
- [30] BOHNE T, GRIEBMANN T, ROLFES R. Development of an efficient buoyant jet integral model of a bubble plume coupled with a population dynamics model for bubble breakup and coalescence to predict the transmission loss of a bubble curtain[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 132: 103436.
- [31] DISSANAYAKE A L, REZVANI M, SOCOLOFSKY S A, et al. Bubble plume integral model for line-source diffusers in ambient stratification [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 147(5): 04021015.
- [32] BEELEN S, KRUG D. Planar bubble plumes from an array of nozzles: measurements and modelling[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2024, 174: 104752.
- [33] WANG Qingyuan, DING Long, XUE Zhenming, et al. Bubble plume dispersion from underwater gas leakage: an experimental and dimensionless modelling study [J]. Applied Ocean Research, 2024, 153: 104305.
- [34] OLIVEIRA M F, VIANNA S S V. A new methodology to estimate the gas ascending time from underwater gas releases [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 82: 105009.
- [35] 张睿,何琪,徐旭,等. 调蓄池水力自清系统放空冲洗特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 47-53. (ZHANG Rui, HE Qi, XU Xu, et al. Characteristics of venting flushing in hydraulic self-cleaning systems for storage tanks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 47-53. (in Chinese))
- [36] LI Qing, ZHANG Rui, XU Hui, et al. Experimental investigation on diffusion and fountain behavior of bubble plumes in quiescent water[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(12): 123314.
- [37] LIMA NETO I E, CARDOSO S S S, WOODS A W. On mixing a density interface by a bubble plume [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 802: R3.
- [38] SIGURÐARDÓTTIR A, BARNARD J, BULLAMORE D, et al. Radial spreading of turbulent bubble plumes [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2020, 378(2179): 20190513.
- [39] MURAI Y, TASAKA Y, NOTO D, et al. Density destratification by a single bubble plume in long horizontal fluid layers and in a dam lake [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2025, 25(1): 4.
- [40] LI Xinhong, CHEN Guoming, KHAN F. Analysis of underwater gas release and dispersion behavior to assess subsea safety risk [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 367: 676-685.
- [41] VANIERSCHOT M, VAN DEN BULCK E. Hysteresis in flow patterns in annular swirling jets [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(6): 513-524.
- [42] 董鑫,刘易诺,叶陈,等. 气泡羽流气液两相流动特性的研究进展[J]. 过程工程学报, 2023, 23(1): 15-24. (DONG Xin, LIU Yinu, YE Chen, et al. Research progress on gas-liquid two-phase flow characteristics of bubble plume [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023, 23(1): 15-24. (in Chinese))
- [43] ALAM M, ARAKERI V H. Observations on transition in plane bubble plumes [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 254: 363-374.
- [44] JULIÁ J E, HERNÁNDEZ L, CHIVA S, et al. Hydrodynamic characterization of a needle sparger rectangular bubble column: homogeneous flow, static bubble plume and oscillating bubble plume [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(22): 6361-6377.
- [45] LIU Liu, YAN Hongjie, ZIEGENHEIN T, et al. A systematic experimental study and dimensionless analysis of bubble plume oscillations in rectangular bubble columns [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 372: 352-362.
- [46] LAUPTSIEN D, COCKX A, LINÉ A. The organized flow structure of an oscillating bubble plume [J]. AIChE Journal, 2021, 67(10): e17334.
- [47] BUWA V V, DEO D S, RANADE V V. Eulerian-Lagrangian simulations of unsteady gas-liquid flows in

- p>
bubble columns [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(7): 864-885.
- [48] FLECK S, RZEHA R. Investigation of bubble plume oscillations by Euler-Euler simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2019, 207: 853-861.
- [49] 张睿, 江扬阳, 谢锋, 等. 旋流沉砂池除砂特性分析及优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 53-59. (ZHANG Rui, JIANG Yangyang, XIE Feng, et al. Analysis and optimization of sand removal characteristics of vortex-type grit chamber [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 53-59. (in Chinese))
- [50] 马霞, 李国栋, 高扬, 等. 不同曝气量和纵横比下针孔喷射气泡羽流摆动特性的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(4): 433-440. (MA Xia, LI Guodong, GAO Yang, et al. Numerical simulation of the oscillating characterization of needle sparging bubble plume under different aeration rates and aspect ratios [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(4): 433-440. (in Chinese))
- [51] CHENG Yixuan, ZHANG Qiong, JIANG Pan, et al. Investigation of plume offset characteristics in bubble columns by Euler-Euler simulation [J]. Processes, 2020, 8(7): 795.
- [52] 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.
- [53] FREIRE A P S, MIRANDA D D, LUZ L M S, et al. Bubble plumes and the Coanda effect [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(8): 1293-1310.
- [54] 肖柏青, 张法星, 刘春艳, 等. 曝气池内气泡羽流附壁效应的试验研究 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 104-107. (XIAO Baiqing, ZHANG Faxing, LIU Chunyan, et al. Coanda effect of bubble plume in aeration tanks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 104-107. (in Chinese))
- [55] 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))
- [56] MANTRIPRAGADA V T, SAHU S, SARKAR S. Morphology and flow behavior of buoyant bubble plumes [J]. Chemical Engineering Science, 2021, 229: 116098.
- [57] ABDULMOUTI H, SHINNEEB M. Investigation of free surface flow induced by a bubbly plume using PIV [C]// 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). Dubai: IEEE, 2020: 1-5.
- [58] BEHZADIPOUR A, AZIMI A H, NETO I E L. Effects of air discharge on bubble dynamics in vertically discharged bubble plumes [J]. Chemical Engineering Science, 2023, 268: 118440.
- [59] THAKER A H, QUIYOOM A, BUWA V V. PIV and PLIF measurements of interacting bubble plumes and their role in liquid-phase mixing in a shallow vessel [J]. AIChE Journal, 2022, 68(11): e17800.
- [60] WU Huijie, WANG Binbin, DIMARCO S F, et al. Impact of bubble size on turbulent statistics in bubble plumes in unstratified quiescent water [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 141: 103692.
- [61] WU Huijie, WANG Binbin. Spectral turbulence kinetic energy budget and scale-based velocity decomposition for turbulence in bubble plumes [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(6): 063301.
- [62] LAUPSIE D, LE MEN C, COCKX A, et al. Effects of liquid viscosity and bubble size distribution on bubble plume hydrodynamics [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 180: 451-469.
- [63] ZHANG Endong, STOCCHINO A, DE LEO A, et al. Performance assessment of bubbles barriers for microplastic remediation [J]. Science of the Total Environment, 2022, 844: 157027.
- [64] SPAARGAREN L. The bubble barrier [D]. Delft: Delft University of Technology, 2018.
- [65] LU Jinshu, XU Zhenfeng, XU Song, et al. Experimental and numerical investigations on reliability of air barrier on oil containment in flowing water [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95(1): 200-206.
- [66] 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.
- [67] DEEN N G, SOLBERG T, HJERTAGER B H. Large eddy simulation of the gas-liquid flow in a square cross-sectioned bubble column [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(21/22): 6341-6349.
- [68] FRAGA B, STOESE T. Influence of bubble size, diffuser width, and flow rate on the integral behavior of bubble plumes [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(6): 3887-3904.
- [69] OLSEN J E, SKJETNE P, JOHANSEN S T. VLES turbulence model for an Eulerian-Lagrangian modeling concept for bubble plumes [J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 44: 61-71.
- [70] XIAO Shuolin, PENG Chen, YANG Di. Large-eddy simulation of bubble plume in stratified crossflow [J]. Physical Review Fluids, 2021, 6(4): 044613.
- [71] DONG Xin, SHAN Yongrui, XUE Can, et al. Bubble plume behavior and turbulence characteristics of gas-liquid phase in power-law fluids [J]. Chemical Engineering &

Technology,2025,48(1):e202400257.

[72] ESPINOZA C L M. Flow structure analysis and velocity field reconstruction using reduced order method (POD and DMD: application to stirred tank and oscillating bubble plume [D]. Toulouse: Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,2022.

[73] 李智. 疏浚工程中气泡式防污帘防污特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.

[74] SANTOS C A V,CAMACHO E A R,SILVA A R R,et al. Influence of a bubble curtain device on microplastics dynamics[J]. Engineering Proceedings,2023,56(1):81.

[75] HAZAR C, TÖZ A C. Numerical and experimental simulation on efficiency of air bubble barrier on various pollutants for preventing oil spill spread [J]. Marine Pollution Bulletin,2024,201:116254.

[76] 赵文彬,黄筱云,夏波,等. 气泡幕水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):16-23. (ZHAO Wenbin, HUANG Xiaoyun, XIA Bo, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of bubble curtains [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):16-23. (in Chinese))

[77] 陈珺,黄燕华,洪朋,等. 基于机器学习模型的河道水位预测[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):9-14. (CHEN Jun, HUANG Yanhua, HONG Peng, et al. Prediction of river water level based on machine learning model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):9-14. (in Chinese))

[78] 刘娣,孙佳倩,余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):7-14. (LIU Di, SUN Jiaqian, YU Zhongbo. Multi-layer soil moisture inversion based on machine learning models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):7-14. (in Chinese))

[79] 杨雪,李昌利. 水下气泡羽流运动模型仿真[J]. 计算机仿真,2023,40(10):331-335. (YANG Xue, LI Changli. Simulation of underwater bubble plume motion model[J]. Computer Simulation,2023,40(10):331-335. (in Chinese))

[80] YANG Xue, SUN Shiming. Underwater bubble plume recognition algorithm based on multi-feature fusion understanding [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence,2024,38(11):2455009.

(收稿日期:2025-07-27 编辑:雷燕)

+++++

(上接第8页)

[65] 崔瑞君,侯精明,王雁鸿,等. 小区绿色屋顶改造对径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):94-110. (CUI Ruijun, HOU Jingming, WANG Yanhong, et al. Effects of green roof retrofitting in residential communities on runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):94-110. (in Chinese))

[66] 张郁媛,宫永伟,张贤巍,等. 基于监测和模拟的简单式绿色屋顶径流系数取值范围分析[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(1):14-25. (ZHANG Yuyuan, GONG Yongwei, ZHANG Xianwei, et al. Monitoring and simulation-based analysis on runoff coefficient value-taking range of extensive green roof [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(1):14-25. (in Chinese))

[67] MONTEIRO C M,SANTOSC,CASTRO P M L. Extensive green roofs:different time approaches to runoff coefficient determination[J]. Water,2023,15(10):1852.

[68] 吴俊,王以尧,马艳. 基于新型径流采集方法的城市不同非渗透下垫面径流系数解析[J]. 环境工程,2021,39(2):47-52. (WU Jun, WANG Yiyao, MA Yan. Analysis on runoff coefficients of different impervious underlying surfaces based on a novel runoff collection method for cities [J]. Environmental Engineering,2021,39(2):47-52. (in Chinese))

[69] 张琳,丁兵,邓金运,等. 基于BP神经网络的城市径流系数对下垫面变化的响应[J]. 长江科学院院报,2025,42(10):32-37. (ZHANG Lin, DING Bing, DENG Jinyun, et al. Response of runoff coefficient to urban underlying surface change based on BP neural network [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(10):32-37. (in Chinese))

[70] 刘洁,张翔,郭舟. 海绵设施结构参数的敏感度分析与优化:以成都某住宅区域为例[J]. 中国农村水利水电,2024(9):160-164. (LIU Jie, ZHANG Xiang, GUO Zhou. Sensitivity analysis and optimization of structural parameters of sponge city facilities: a case study of a residential area in Chengdu [J]. China Rural Water and Hydropower,2024(9):160-164. (in Chinese))

[71] 赵纪芳,翟家齐,刘玉春,等. 滦河流域径流系数时空变化特征及影响因素研究[J]. 水电能源科学,2022,40(3):26-29. (ZHAO Jifang, ZHAI Jiaqi, LIU Yuchun, et al. Research on temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of runoff coefficient in Luanhe River Basin [J]. Water Resources and Power,2022,40(3):26-29. (in Chinese))

[72] 司伟,黄思琦,王培霞,等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):1-7. (SI Wei, HUANG Siqi, WANG Peixia, et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-11 编辑:俞云利)