

基于 VOF 数值模拟的扬水曝气器提水性能研究

常志英^{1,2}, 黄廷林¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为探析扬水曝气器内部流动特性, 本文采用 VOF (Volume of Fluid) 法对扬水曝气器流场进行数值模拟, 通过对比模拟和实验结果验证了模型的可靠性, 详细分析了扬水曝气器内部气弹形成和释放过程及其流动特征, 讨论了不同曝气速率和气室体积大小对扬水曝气器提水性能的影响。研究表明: 数值模拟和试验结果间的误差在 6% 以内, 该方法可靠; 利用 VOF 方法有效模拟了气室中气体的聚集、气弹形成及释放过程, 并发现气体进入上升筒中所形成的并不是一个整体气弹, 气弹后还尾随许多中小气泡, 研究加深了对扬水曝气器内部流动特性的认识; 出口平均流速随着曝气速率的增大而增大, 随着气室体积的减小而增大, 并在参数的计算范围内给出了其拟合关系式; 其规律与丛海兵给出的结论一致, 进一步印证了本文方法在扬水曝气器性能研究中的适用性, 为后续扬水曝气器各项参数的优化设计提供了可靠的分析手段, 具有较大的工程应用价值。

关键词: 扬水曝气器; 提水性能; 数值模拟

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0117-09

Research on the water lifting performance of water-lifting aerator based on VOF

CHANG Zhiying^{1,2}, HUANG Tinglin¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to analyze the internal flow characteristic of the water-lifting aerator, VOF (volume of fluid) method was used to simulate the flow field of the water-lifting aerator, the reliability of the VOF model was verified by comparing the simulation results with the experimental results, the formation and release process and flow characteristics of the air piston in the water-lifting aerator were analyzed in detail, the effects of different aeration rates and air chamber volume on the water lifting performance of the water-lifting aerator were discussed. The results show that: the error between numerical simulation and experimental results is less than 6%, so the method is reliable; VOF method is used to effectively simulate the process of gas accumulation, gas formation and release in the gas chamber, and it is found that the gas entering the ascending tube is not a whole piston, and many small and medium bubbles are also followed after the piston, which deepens the understanding on the flow characteristics of the internal flow in the water-lifting aerator. The results show that: the average outlet velocity increases with the increase of aeration rate, and increases with the decrease of air chamber volume, and its fitting relationship is given within the calculation range of parameters; the law is consistent with the conclusion given by Cong Haibing, which further verifies the applicability of the method in the performance study of the water-lifting aerator, and provides a reference for the optimization design of various parameters of the water-lifting aerator, has great engineering application value.

Key words: water-lifting aerator; water-lifting performance; numerical simulation

随着我国对城市地下水开采的限制, 水库成为城市的主要供水水源, 但由于不断受到城市污水、工业废水等点源污染和农业生产、水土流失等面源污染的

影响, 水体富营养化及藻类大量繁殖已成为我国水库的主要水质问题, 严重的水源水质污染与富营养化导致水厂处理难度加大、制水成本与水质超标风险大幅

收稿日期: 2020-10-29

修改稿日期: 2021-1-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979217); 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-02)

第一作者: 常志英(1983—), 男, 博士生, 主要从事扬水曝气系统数值模拟研究。E-mail: changzhiying@xauat.edu.com

通讯作者: 黄廷林(1962—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为水处理理论与技术和水质微污染控制与水资源保护。E-mail: huangtinglin@xauat.edu.com

提高,严重威胁城市居民的饮水安全^[1].

为了有效解决该问题,黄廷林等^[2-7]在国外曝气器基础上研发出扬水曝气这一新型水质原位改善技术,扬水曝气器的主要功能是充氧和诱发并促使水体混合.扬水曝气系统由扬水曝气器、空气压缩系统和供气管路组成,扬水曝气器是其核心组成部分,由上升筒、水密舱、曝气室、气室、回流室、微孔曝气器、进气管和锚固墩等组成,内部结构如图 1 所示,扬水曝气器在水密舱浮力的作用下竖直悬浮于水中,并通过锚固链固定在沉于水库底部的混凝土锚固墩上,上升筒上端接近水面,下端接近水库底部.系统运行时压缩空气先被送至扬水曝气器底部的进气管,经由气体释放器释放出来,在上升至曝气室的过程中给下层水体充氧;未溶解的残余气体会逐渐在气室累积,当气室内气体收集满后,气室内气体会迅速进入扬水曝气器的中间上升筒,形成大型气弹推动筒内水流向上流动同时携带水库底层水上升至表层,促使水体混合,同时曝气室内充氧后的水体会通过回流室直接回到底层水体,从而达到给下层水体直接充氧的功能.这使得扬水曝气技术不仅能在水体掺混的过程中将表层藻类输送至水温溶解氧浓度较低、光照较弱的中下层水体,控制藻类的过量繁殖和水体富营养化;还能提高水体溶解氧含量,有效抑制底泥中污染物的释放.该技术既具备扬水筒的功能又结合了深水曝气向底层水体直接充氧的功能,使其对水库水质污染控制与水质改善的效能进一步得到加强,该技术现已成功应用于太原汾水库、西安金盆水库、延安红庄水库、西安李家河水库和山东周村水库等多个水源水库.

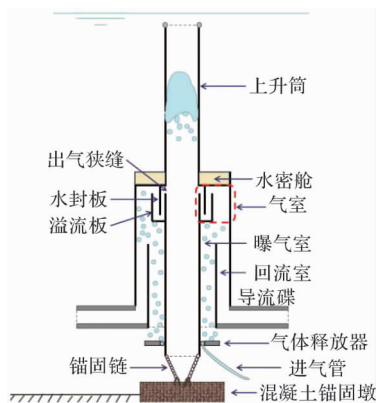


图 1 扬水曝气器结构图

Fig. 1 Diagram of the water-lifting aerator's configuration

针对扬水曝气系统的性能和应用,研究人员开展了大量工作,主要集中在除藻、人工强制诱导混合以及底层水体充氧等方面.丛海兵^[4,6]通过对扬

水曝气器内气弹在上升筒内上升过程的受力分析推导出气弹在筒内加速段和减速段的气弹速度的简化微分方程,采用小试实验验证了其理论结果的正确性,并分析了曝气量、气室大小和内筒直径等等参数对扬水曝气器提水性能的影响;朱伟峰^[8]利用单相流模型对曝气器外流场进行了二维数值模拟,其研究得到扬水曝气器系统运行中,曝气器周边水形成的旋涡对流场混合起重要作用;在此基础上,王进行^[9]和赵伟丽^[10-12]针对不同水温分层和水深条件下扬水曝气器系统运行过程中的流场混合时间和控藻效果进行的研究发现:温度梯度的增加会使外流场达到稳定状态所需时间增加,水深的变化对扬水曝气系统除藻效率影响显著;龙圣海^[13]和李扬^[14,15]利用 MIKE3 软件建立了水库三维水温模型,发现水体混合的过程呈现出分层密度流;张梦丹^[16,17]首次采用 VOF 模型对扬水曝气器气水两相流的流场和出口流速分别进行了基于 FLUENT 的数值模拟;孙昕^[18]通过单相流模拟外围流场,对扬水曝气器出流结构进行了优化设计.上述这些工作大都是针对扬水曝气器诱导水体混合的研究.

促使水体混合是扬水曝气系统的核心功能,而提水效果又对水体混合效果起到重要影响,曝气器内气弹的形成和运动规律直接决定了整个系统的提水能力.目前对该过程的研究并不十分深入,但在系统运行中又无法对此过程进行详细观测,通过现场实测的方式来对其研究困难较大.因此,理论分析和数值模拟这两种手段成了研究者们努力方向.丛海兵^[4,6]通过建立数学模型的理论分析方法对上升筒中的流速进行研究,其把上升筒进出口间所有的气体和水体作为一个隔离体来整体分析并建立其动力学方程,得出了加速阶段气弹上升速度的解析表达式,又通过小试实验验证了该数学模型的准确性.但是,该模型是在假设上升筒内气弹为单个整体气弹的条件下推出的,而实际工况中上升筒内会的情况复杂多变,大气弹后面会尾随数量众多的中小气泡,此时,该数学模型既无法再对中小气泡在上升筒中运动时的速度变化做出分析,又无法对气液界面的变化进行详细描述,同时气弹从上升筒出口溢出后的破碎问题也无法通过该方法来研究,而准确的界面分析对深入理解气弹的形成和释放过程至关重要.因此,这些复杂问题的解决必须借助于数值模拟来进行,本文采用 VOF 方法进行数值模拟. VOF 方法是一种有效的前端捕捉界面追踪方法^[19],该方法通过求解单一的动量方程和追踪每个流体在计算域内的体积分数来模拟两种

或者多种的不相溶流体,它既可以在精度足够高的网格下较为准确的捕捉气液交界面又同时保持质量始终守恒,该方法目前广泛应用于气液两相流问题的研究中^[20-22],但这些研究的关注点大都集中在微气泡以及中小尺度气泡方面,针对扬水曝气器中大气泡的研究很少,文献17采用VOF模型,应用FLUENT数值模拟了不同曝气量条件下的设备出流速度。

本文首先通过模拟和试验的对比验证模拟方法的可靠性,在此基础上对扬水曝气器气室中气体的集聚及气弹的释放过程进行深入分析,并研究曝气速率和气室体积的变化对扬水曝气器提水性能的影响,为后续进一步优化扬水曝气器和工程应用提供依据。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程

连续方程为

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

动量方程为

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vof}} \quad (2)$$

式中, \mathbf{u} 为速度矢量; p 为静压强; ρ 和 μ 分别代表体积加权平均密度和动力黏度; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{F}_{vof} 为表面张力源项,此处采用Brackbill等提出的连续表面张力模型^[23],将表面张力定义为一种作用于相界面区域网格单元内流体的体积力。

$$\mathbf{F}_{\text{vof}} = \sigma k_k \frac{\rho \nabla \varphi_k}{\frac{1}{2}(\rho_g + \rho_l)} \quad (3)$$

$$k_k = \nabla \cdot \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \quad (4)$$

$$\mathbf{n} = \nabla \varphi_k \quad (5)$$

式中: k_k 为界面曲率, φ_k 为定义在网格中心的体积分数。

计算中,不同相的流体共用一套控制方程,VOF方法通过引入体积分函数实现对相间界面的追踪。体积分方程表示为

$$\frac{\partial \varphi_q}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi_q \quad (6)$$

式中, φ_q 为第 q 项体积分。

对于气液两相流公式(1)~(2)中 ρ 和 μ 由体积分决定

$$\rho = \varphi_1 \rho_1 + (1 - \varphi_1) \rho_g \quad (7)$$

$$\mu = \varphi_1 \mu_1 + (1 - \varphi_1) \mu_g \quad (8)$$

式中:下标 g 表示气相;下角标 l 表示液相。

体积分通过计算每个网格中气相所占的体积分 φ_g 和 φ_l 来追踪两相之间的界面,当 $\varphi_l = 1$ 时,该区域充满液相;当 $\varphi_l = 0$ 时,该区域充满气相;当 $0 < \varphi_l < 1$ 时,该区域为两相界面,任意网格中都满足 $\varphi_g + \varphi_l = 1$ 。

1.2 计算模型及边界条件

本文计算以山东周村水库扬水曝气系统作为研究背景建立模型,如图2(a)所示,将模型由三维简化为二维,流场半径50m,流场总高25m,扬水曝气器总高10m,曝气器下端距库底距离2m,上升筒半径0.4m,上升筒淹没深度5m。扬水曝气器简化模型包括:上升筒、气室、气体释放器、回流室和水密舱,见图2(b),采用四边形结构网格,为模拟扬水曝气器内部气弹运动细节,对曝气器内部网格进行局部加密,总网格数为 4.4×10^4 ,文中后续计算均采用相同的网格设置,计算流场底部和右侧边界设置为无滑移壁面;流场上边界设置为流场出口,采用自由出流边界;曝气器壁面均采用无滑移边界条件;气体释放器设置为速度入口边界条件。通过初始化流场来指定初始时刻的气相和液相区域,液面上方8m区域设定为空气,液面下方17m区域设定为水,如图2(c)所示。

选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,多相流模型采用VOF模型,体积分方程采用显式时间格式离散求解,对动量方程、湍动能方程和湍流扩散率方程均使用二阶迎风格式,并使用PRESTO方法离散压力,利用PISO格式的速度压力耦合方法进行速度场求解,界面跟踪方法采用Geo-Reconstruct,时间步长取0.01~0.1s,时间步长的大小视计算稳定性和收敛性而定,曝气速率越大或气弹周期越小,时间步长选取越小,内迭代步数统一取50步。

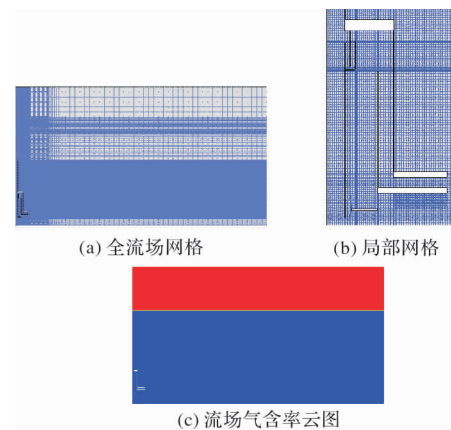


图2 计算模型网格及相位图

Fig. 2 Computational domain grids and phase diagram

1.3 模拟方法验证

丛海兵^[4]通过小试实验在模型上测定了上升筒流速的变化过程,为了验证本文数值模拟方法的正确性,针对该实验模型建立了相应计算模型,采用本文的模拟方法进行气弹生成周期内提水速度的研究分析。如图 3 所示,针对扬水曝气器上升筒流速分布,对比文献^[6]中模型 2 的试验结果和本文数值模拟计算结果,数值模拟和试验结果误差在 6% 以内,可知数值模拟结果和实验结果吻合良好,说明本文所采用的数值模拟方法可信,该方法可用于后续对气室内气体积聚和气弹形成过程的研究分析及对扬水曝气器的参数优化。

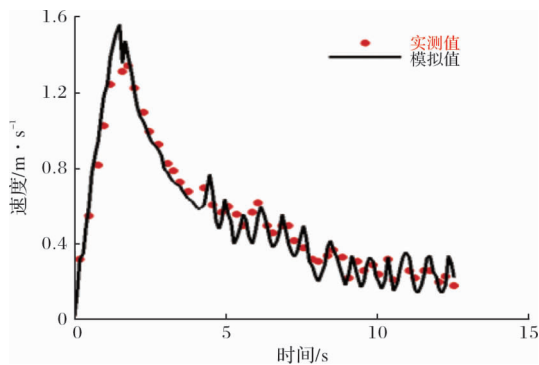


图 3 上升筒流速实测值^[6]与计算结果对比

Fig. 3 Comparison of computational and experimental results of the velocity in the ascending tube

2 模拟结果与分析

本文研究是基于山东周村水库扬水曝气系统所进行的。为了详细分析气弹形成和释放过程,并在淹没水深、扬水曝气器高度、上升筒直径等其他参数都确定的前提下研究曝气速率和气室体积的变化对扬水曝气器提水性能的影响,以三个气室大小不同的模型为研究对象:气室_520、气室_900 和气室_1200,三个气室的有效体积^[4]分别为 0.455 m³、0.797 m³ 和 1.067 m³;图 4 给出三个模型的对比图,气室_520 模型的宽度为 520 mm,气室_900 模型的宽度为 900 mm,气室_1200 模型的宽度为 1 200 mm。为得到较为可信的计算结果,该三个模型的计算网格采用相同网格拓扑结构和加密,网格总数均为 4.4×10⁴。

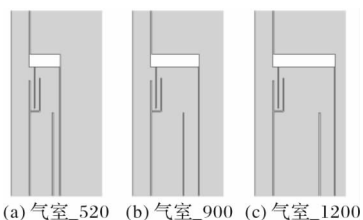


图 4 计算模型对比

Fig. 4 Comparison of computational model

为了便于对比分析,本文采用曝气速率来表征气体释放器释放气体的速度,曝气速率 v_0 与气体释放器出口面积 A_0 的乘积即为曝气量 Q_0 。

$$Q_0 = v_0 \cdot A_0 \quad (9)$$

为了定量分析扬水曝气器提水性能,本文通过对上升筒出口速度进行平均化处理得到出口平均流速,出口平均速度 v_{av} 与上升筒断面面积 A 的乘积即为扬水曝气器单位时间的提水量 Q ,提水量是衡量扬水曝气器提水能力的重要指标。

$$Q = v_{av} \cdot A \quad (10)$$

在气体释放器出口面积确定的条件下根据曝气量确定出 5 个不同曝气速率,进而设置了 7 个计算工况。表 1 给出每个计算工况对应的模型、曝气速率和气室体积。

表 1 计算工况表

Tab. 1 Simulation conditions

计算工况	曝气器模型	曝气速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	气室体积/ m^3
计算工况一	气室_900	0.1	0.797
计算工况二	气室_900	0.3	0.797
计算工况三	气室_900	0.5	0.797
计算工况四	气室_900	0.7	0.797
计算工况五	气室_900	1.0	0.797
计算工况六	气室_520	0.3	0.455
计算工况七	气室_1200	0.3	1.067

2.1 气弹形成过程分析

通过对表 1 中计算工况一的结果进行分析来得到气弹形成过程中的扬水曝气器内部速度变化规律。此模型对应的气室体积为 0.797 m³,曝气速率为 0.1 m/s,分析上升筒出口流速即可得到上升筒内的流速变化特征,图 5 给出了该模型运行中上升筒出口速度随时间的三个周期变化过程。

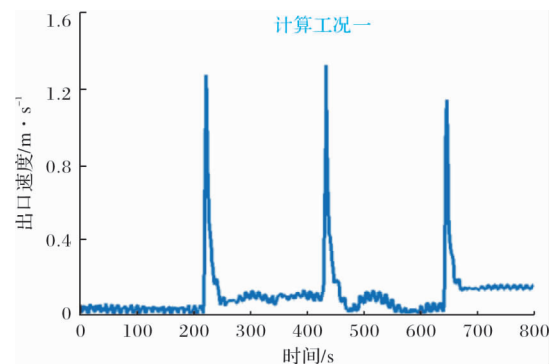


图 5 上升筒流速周期变化情况

Fig. 5 Water flow velocity with time in the ascending tube

由表知:气弹平均周期为 213 s, 出口平均流速为 0.114 m/s, 出口速度峰值均值约为 1.271 m/s. 分析可得:上升筒出口流速在 0~217 s内均在很小的值域范围波动, 此时曝气器气室内气体逐渐从零聚集到充满状态; 217~222 s为出口流速的剧增段, 此过程中为气弹释放阶段, 在此期间上升筒出口流速处于加速上升阶段, 直至最大流速 1.34 m/s; 随着气弹离开上升筒, 筒内水体向上流出筒外的速度逐渐减小, 222~247 s即对应该减速阶段, 该过程中上升筒出口流速降低, 降低至 0.1 m/s; 之后气室中的气体再次开始累积, 出口流速又开始新一轮的波动过程, 该过程循环往复, 不断释放气弹的过程也伴随着出口速度的周期性上升和下降.

图 6 所示计算工况一第二个气弹周期内扬水曝气器内部不同阶段的流动状态, 用气液两相体积分数表示的气含率云图表示气、液两相的分布, 红色区域代表气相, 蓝色区域代表液相. 图 6 中(a)、(b)、(c)为气泡的集聚过程, (d)和(e)为气弹的生成和释放过程. 如图 6(a)所示, 在 240 s 时气液交界面未下降至溢流板上沿, 当气体释放器开始释放气泡时, 大部分气泡流过曝气室上升至气室中聚集, 少量气泡通过出气狭缝进入上升筒中; 随着气体聚集逐渐增多, 气液交界面降至溢流板上沿以下, 见图 6(b), 此时气室水体与上升筒水体间的联通被气室空气隔断, 气泡不再通过出气狭缝进入上升筒, 气液交界面被分割成了水封板内外两部分; 随着气泡在气室内的聚集, 气室内气体体积增大, 同时水封板两侧气液交界面下降, 当界面位置降至水封板下沿时, 此时气室内气体体积达到最大, 如图 6(c)所示; 随着气体持续汇入气室, 气室内气体体积继续增大, 气液交界面下降至水封板下沿以下, 气体受力平衡状态被打破, 浮力促使其越过水封板并快速穿过出气狭缝进入上升筒, 见图 6(d); 气室内的气体在两侧水压差的作用下被挤入上升筒, 在上升管中形成大气弹, 气弹带动水体向上运动, 如图 6(e)所示. 在气弹释放后, 因上升筒内水流速度较大, 带动气室内水体和气泡通过出气狭缝进入上升筒. 当上升筒内水流速度下降至一定值时, 气室内气泡才开始聚集, 随后气室内又开始重复上述储气和向外释放气弹的过程.

值得关注的是图 6(e)中并不是一个整气弹, 大气弹后方还伴随有大小不一的中小气泡群. 本文采用的 VOF 方法可不受气弹形态的限制, 对气弹破碎和聚并等复杂问题进行分析.

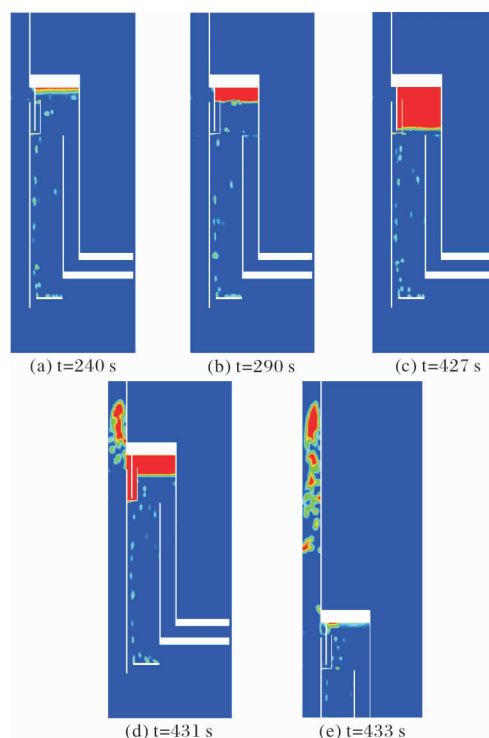
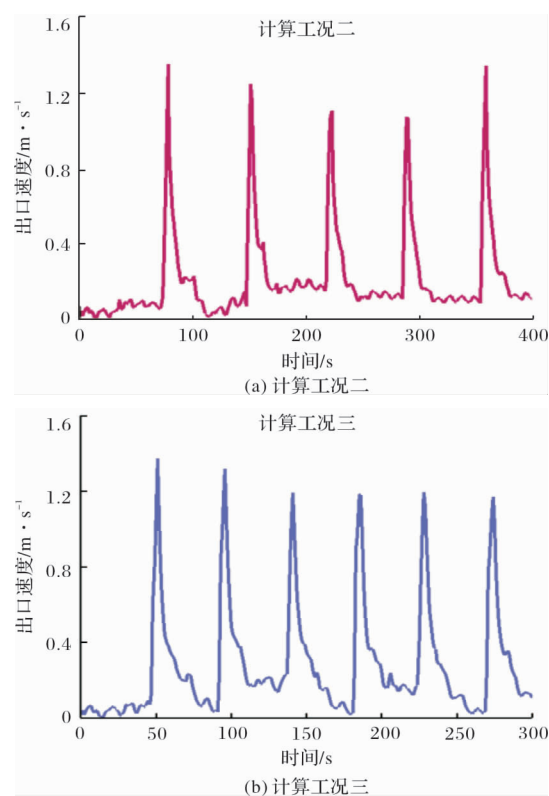


图 6 气弹生成释放过程

Fig. 6 The generation process of the air piston

2.2 曝气速率对提水性能的影响

对计算工况一、计算工况二、计算工况三、计算工况四和计算工况五进行比较分析, 讨论不同曝气速率对扬水曝气器提水性能的影响. 工况参数详见表 1, 所采用的扬水曝气器模型为气室_900, 五个计算工况对应的曝气速率分别为 0.1 m/s、0.3 m/s、0.5 m/s、0.7 m/s 和 1.0 m/s.



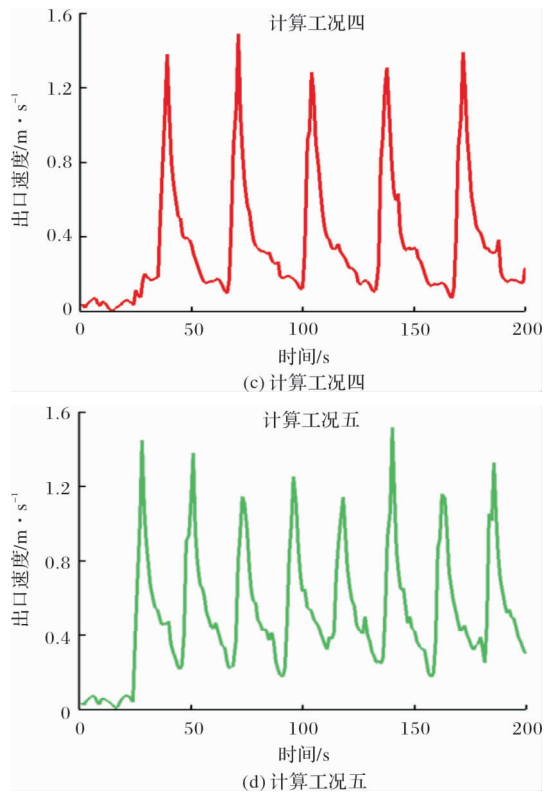


图 7 不同工况相同气室条件下上升筒出口流速变化特征

Fig. 7 Distributions of the velocity in the outlet of ascending tube for case two to case five

图 7(a)~图 7(d)给出计算工况二、计算工况三、计算工况四和计算工况五的扬水曝气器上升筒出口速度随时间变化曲线,出口速度为扬水曝气器上升筒出口的断面平均流速,图中以气体释放器开始释放气体作为周期起点。

由于气弹的生成和释放是非定常过程,流动状态的不稳定导致每个气弹的形成和释放过程都存在差别,为取得较为准确的结果,对所有统计的气弹周期和上升筒出口速度峰值进行平均化处理,从而得到气弹的平均周期和出口流速峰值均值。统计结果显示:计算工况一的气弹平均周期 213 s,计算工况二的气弹平均周期 73 s,计算工况三的气弹平均周期 45 s,计算工况四的气弹平均周期为 32 s,计算工况五的气弹平均周期为 23 s。随着曝气速率增加,单位时间通过气体释放器进入水体的气量也随之增多,相同体积气室充满所需时间更短,气弹周期更小。

由表 2 可知:伴随从计算工况一到计算工况五的曝气速率从 0.1 m/s 增加至 1.0 m/s,上升筒出口流速峰值均值从 1.271 m/s 增加至 1.422 m/s,出口平均流速从 0.114 m/s 增加至 0.510 m/s,气弹平均周期从 213 s 降低至 23 s。曝气速率的增加不仅使气弹周期减小,也增大了上升筒出口流速峰值,这是由于伴随曝气速率的增加会使水体中释放气泡的速度更大,气泡带动水体运动的频率也越高,气泡和水之间的动量交换更剧烈,增强了水体向上运动的动量。综上所述:相同模型条件下,曝气速率越大,上升筒出口流速峰值均值和出口平均流速越大,曝气器提水能力越强;曝气速率越小,上升筒出口流速峰值均值和出口平均流速越小,曝气器提水能力越弱。

表 2 不同曝气速率条件下提水性能数值模拟结果

Tab. 2 Computational results of the water lifting performance with different aeration rate

	计算工况一	计算工况二	计算工况三	计算工况四	计算工况五
曝气速率 $v_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
气弹平均周期 T_{av} / s	213	73	45	32	23
出口流速峰值均值 $v_{\max-av} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.271	1.296	1.345	1.373	1.422
出口平均流速 $v_{av} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.114	0.209	0.293	0.383	0.510

2.3 气室体积对提水性能影响

采用计算工况六、计算工况二和计算工况七进行气室体积对扬水曝气器提水性能影响研究。其对应的模型分别为气室 _ 520、气室 _ 900 和气室 _ 1200,详细参数见表 1。图 8 给出各计算工况下扬水曝气器上升筒出口速度随时间变化情况,图中以实际运行状态下气体释放器开始释放气体作为周期起点。

由图 8 可知在曝气速率一定的条件下,气室体积增加,则气体充满气室的时间增加,气弹周期变大,出口流速峰值不同,单个周期内出口速度的变化也有差别,气室体积较小模型的出口速度具有峰值低、速度落差小和周期短的特点,气室体积较大模型的出口速度具有峰值高、速度落差大和周期长的特点。究其原因可知:气室小则释放出的气弹体积小,较小的体积导致气弹所受则浮力小,较小的

浮力不能带动水体做快速的上升运动, 从而导致最大速度峰值小; 小气室的气弹平均周期小, 相邻两个气弹间隔时间短, 使得整个时间轴上上升筒内流速都保持在较高的值, 分析可知: 在曝气速率一定的前提下, 小气室的扬水曝气器气弹更快的形成并释放, 从而促进水库底部的水体的提升, 通过上升筒出口速度变化可知, 由于气弹从上升筒中流出后上升筒中的水体流速就开始逐渐减小, 直到第二个气弹的释放才能重新增大. 由前面分析可知, 周期越短, 则气弹释放的时间间隔越小, 这就使得上升筒内的速度还未降到最小就再次在新释放气弹的带动下加速上升, 这使得小气室的出口平均速度能保持在较大值.

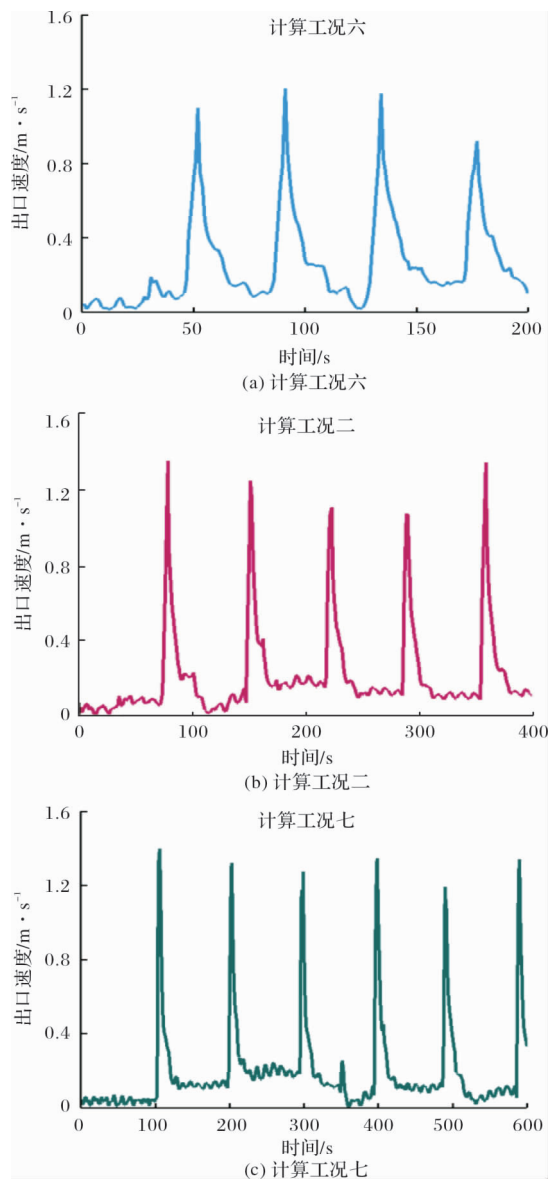


图 8 相同工况不同气室条件下上升筒出口流速变化特征
Fig. 8 Distributions of the velocity in the outlet of ascending tube for case two and case six to case eight

为了分析气室体积变化对提水性能的影响, 采用和表 2 相同的方法对计算结果进行后处理分析, 结果见表 3. 计算工况六、计算工况二和计算工况七对应的气室体积从 0.455 m^3 增至 1.067 m^3 , 随着气室体积的增大, 其气弹平均周期从 41 s 不断升至 97 s , 各工况对应的上升筒出口流速峰值均值分别为 1.136 m/s 、 1.296 m/s 和 1.333 m/s . 由此可知: 相同曝气速率条件下, 气室体积越大, 气弹平均周期越大; 在给定曝气速率的条件下, 气室体积越大则气弹周期越长, 上升筒内气弹体积越大, 气弹所受浮力越大, 提水作用越强.

表 3 不同气室体积条件下提水性能数值模拟结果

Tab. 3 Computational results of the water lifting performance with different effective volume of the aeration chamber

	计算工况六	计算工况二	计算工况七
气室体积 V_0/m^3	0.455	0.797	1.067
气弹平均周期 T_{av}/s	41	71	97
出口流速峰值 均值 $v_{\text{max-av}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.136	1.296	1.333
出口平均 流速 $v_{av}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.262	0.209	0.192

由表 3 可知随着气室体积的不断增大, 出口平均流速从 0.262 m/s 不断降低至 0.192 m/s , 该变化特征和上升筒出口流速峰值均值的规律正好相反. 分析可知: 扬水曝气器气室体积增大带来了峰值速度的提升, 同时也大幅增加了气弹周期, 由于气弹释放的过程持续时间短, 相对于增加的更多低速周期区间来讲速度峰值的提升对平均流速的作用显得微不足道, 因此出口平均流速随着气室体积的增大反而不断减小. 综上所述: 气室体积越大, 上升筒出口流速峰值均值越大, 出口平均流速越小, 曝气器提水能力越弱; 气室体积越小, 上升筒出口流速峰值均值越小, 出口平均流速越大, 曝气器提水能力越强.

综上所述, 基于 VOF 数值模拟的本文后处理结果给出了出口平均流速、气弹平均周期和出口流速峰值均值等多个统计数据, 为全面深入分析扬水曝气器提水性能提供了有力技术支撑; 同时通过该方法可以捕捉到气室和上升筒中的详细流动细节及过程, 为后续扬水曝气器精细优化设计提供可靠保障, 具有重要工程应用价值.

4 结论

(1)本文采用VOF方法得到的计算结果和实验结果吻合良好,误差在6%以内,表明本文研究方法可行,结果可信,可作为后续气弹运动过程分析的依据;

(2)通过数值模拟详细分析了气室中气体聚集、气弹形成及释放的过程,得到了气弹出口速度随时间变化分布,并发现气体进入上升筒中所形成的并不是一个单独的整体气弹,气弹后方还伴随有众多中小气泡,气泡在上升过程存在破碎和聚并等复杂的流动现象,这是采用数学模型方法所无法分析的,研究加深了对扬水曝气器内部流动规律的认识;

(3)分析了不同曝气速率和气室大小对扬水曝气器性能的影响.研究表明:增加曝气速率可以缩短气弹周期,增加出口平均流速,从而提升扬水曝气器提水能力;增大气室体积会使气弹周期增长,虽然出口流速峰值增加,但除去峰值外其他位置出口流速过低,使得出口平均流速减小,减小了平均提水量,降低了扬水曝气器提水能力.

综上可知,本文所采用的方法能为后续扬水曝气器各项参数的精细优化设计提供有力的技术支撑,具有更大的工程应用价值.

参考文献 References

- [1] 黄廷林. 水源水库水质污染原位控制与改善是饮用水水质安全保障的首要前提[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 1-3.
HUANG Tinglin. In-situ control of water pollution and improvement of water quality in water source reservoirs is the primary precondition for the safety of drinking water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(1): 1-3, 69.
- [2] 丛海兵, 黄廷林, 缪晶广, 等. 水体修复装置—扬水曝气器的开发[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 41-45.
CONG Haibing, HUANG Tinglin, MIAO Jing-guang, et al. Development of rehabilitation device for water body-water lifting aerator[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(3): 41-45.
- [3] 丛海兵, 黄廷林, 缪晶广, 等. 扬水曝气器的水质改善功能及提水、充氧性能研究[J]. 环境工程学报, 2007, (1): 7-13.
CONG Haibing, HUANG Tinglin, MIAO Jing-guang, et al. Study on water improvement function, capacity of lifting water and oxygenation of a water-lifting aerator[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007 (1): 7-13.
- [4] 丛海兵. 扬水曝气水源水质改善技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
CONG Haibing. Studies on source water quality improvement technology of water-lifting and aerator[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2007.
- [5] CONG Haibing, HUANG Tinglin, CHAI Beibei, et al. An new mixing-oxygenating technology for water quality improvement of urban water source and its implication in a reservoir. Renewable Energy[J], 2009, 34(9): 2054-2060
- [6] 黄廷林, 丛海兵, 柴蓓蓓. 饮用水水源水质污染控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
HUANG Tinglin, CONG Haibing, CHAI Beibei. Source water quality pollution and control. [M] Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [7] CONG Haibing, HUANG Tinglin, CHAI Beibei. A Water-Circulating Aerator: optimizing structure and predicting water flow rate and oxygen transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(6): 659-667.
- [8] 朱伟峰. 基于CFD的扬水曝气器外围流场及曝气室流场模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
ZHU Weifeng. Numerical simulations on the periphery flow field of water-lifting aerator and the flow field of aeration chamber[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2008.
- [9] 王进行. 温度分层及水深对扬水曝气器流场影响的CFD模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
WANG Jinxing. Numerical simulations of effects of thermal stratification and water depth on flow around water-lifting aerator[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2010.
- [10] 赵伟丽. 深水型水库扬水曝气混合原位控藻数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013
ZHAO Weili. Simulation of algal inhibition using In-situ water-lifting aeration technology in deep-water reservoirs[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2013.
- [11] SUN Xin, ZHAO Weili, HUANG Tinglin. Effects of water depth on algae control in stratified reservoirs using in-situ water-lifting aeration technology[J]. Advanced Materials Research, 2013, 663: 977-981.
- [12] SUN Xin, ZHAO Weili, HUANG Tinglin. Effects of

- temperature gradient on algae inhibition zone in source water reservoirs using in-situ water-lifting aeration technology[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 663: 870-875.
- [13] 龙圣海. 峡谷分层型水源水库水质变化特征及水温结构模拟研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.
- LONG Shenghai, Water quality characteristics and water temperature simulation of a canyon-shaped, stratified, source water reservoir[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2017.
- [14] LI Yang, HUANG Tinglin, ZHOU Zizhen, et al. Effects of reservoir operation and climate change on thermal stratification of a canyon-shaped reservoir, in northwest China[J]. *Water Science & Technology Water Supply*, 2018, 18(2): 418-429.
- [15] 李扬. 分层型水源水库水温模拟及扬水曝气系统运行优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- LI Yang, Water temperature simulation of a stratified source water reservoir and optimal operation of water-lifting aerator system[D] Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2018.
- [16] 孙昕, 张梦丹, 黄廷林, 等. 扬水曝气器类型对分层水库藻类控制效果的影响[J]. *环境科学研究*, 2014, (12): 1479-1485.
- SUN Xin, ZHANG Mengdan, HUANG Tinglin, et al. Comparison of water-lifting aerator type for algae inhibition in stratified reservoirs[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, (12): 1479-1485.
- [17] 张梦丹. 深水型水库扬水曝气系统优化[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
- ZHANG Mengdan, System optimization of water-lifting aeration in deep-water reservoirs[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2014.
- [18] SUN X, LI X L, ZHANG M D, et al. Comparison of water-lifting aerator type for algae inhibition in stratified source water reservoirs[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 624-634.
- [19] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid(VOF) method for dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [20] GUO F, CHEN B. Numerical study on Taylor bubble formation in a micro-channel T-junction using VOF method[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2009, 21(1): 51-58.
- [21] WANG L J, JIA Y, YAN X K, et al. Gas-liquid numerical simulation on micro-bubble generator and optimization on the nozzle to throat spacing[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2015, 10(6): 893-903.
- [22] 丁国栋, 陈家庆, 蔡小垒, 等. 文丘里管式微气泡发生器内单气泡碎化行为的数值模拟[J]. *化工进展*, 2020, 39(7): 2590-2598.
- DING Guodong, CHEN Jiaqing, CAI Xiaolei, et al. Numerical simulation of single bubble breaking behavior in Venturi microbubble generator[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(7): 2590-2598.
- [23] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. *Journal of computational physics*, 1992, 100(2): 335-354.
- (编辑 沈 波)