

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.016

不同液体介质下小型气力提升泵水力特性分析

左娟莉, 杨 泓, 魏炳乾, 张 凯, 吴 霜

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 污水处理、深井采油、核能领域采用气力提升技术具有显著优势。为深入研究液体介质密度对气力提升泵性能的影响规律,本文基于 Fluent 软件采用欧拉模型、标准 $k-\epsilon$ 湍流模型数值模拟空气-水、空气-水银、空气-煤油三种小型气力提升泵内气液两相流动及其水力特性,并将空气-水气力提升泵的计算结果与其实验数据进行对比验证。研究结果表明:①提升管内总压降随充气量的增加而单调递减;相同气流量下,液体介质密度越大,提升管进出口压降越大;②气力提升泵提升液体流量随着气体注入流量的增大先快速增多,后增加缓慢;相同气流量下,液体介质密度越大,其提升液体流量越大;③随着气流量的增加,提升效率先增加后降低;相同气流量下,液体介质密度越大,其提升效率越大。本文研究成果将为污水处理、深井采油、核能领域的气力提升技术的应用提供坚实理论基础。

关键词: 气力提升系统; 数值模拟; 密度; 提升效率

中图分类号: TK72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)03-0376-07

Analysis of hydraulic characteristics of small air lift pump with different liquids

ZUO Juanli, YANG Hong, WEI Bingqian, ZHANG Kai, WU Shuang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The air lift pump has a large of significant advantages in sewage treatment, deep well oil recovery and nuclear energy field. At present, the influence of liquid medium density on air lift pump is not much discussed. Therefore, in this paper, based on Fluent software, the Euler model and standard $k-\epsilon$ model, the hydraulic characteristics of small air-water, air-mercury, air-kerosene lift pumps are simulated, with the calculation results of air-water pump verified with its experimental data. The results show that:①The total pressure drop decreases monotonously with the increase of flow rate of injected air. At the same gas flow rate, the greater the difference in density, the easier the gas rises and the greater the total pressure drop. ②The flow rate of liquid in the riser pipe increases with the increase of the gas injection flow rate rapidly, and then increases slowly. At the same gas flow rate, the flow rate of liquid increases with the increase of the medium density. ③ With the increase of air flow rate, the lifting efficiency increases significantly and then decreases. At the same gas flow rate, the lifting efficiency increases with the increase of medium density. These researches provide a solid theoretical basis for sewage treatment, deep well oil recovery and nuclear energy field.

Key words: air lift system; numerical simulation; density; lifting efficiency

气力提升泵以压缩机为动力源,以空气为工质,结构简单,性能可靠,维修方便。与传统泵相比,其最大的优势在于可运输传统泵不易运输的各类特殊

流体。在工业生产中,它被广泛用于运输高温、高压、具有腐蚀性和被污染的流体。因此,研究气力提升泵的提升性能及其内部水力特性对工业发展具有

收稿日期: 2019-11-14; 网络出版日期: 2020-07-18

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200717.1733.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605136);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JLZ-16)

第一作者: 左娟莉,女,博士,讲师,研究方向为多相流动。E-mail: Jenzuo@163.com

通信作者: 魏炳乾,男,博士,教授,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: weibingqian@xaut.edu.cn

深远影响。目前,由于气力提升泵与维护成本较低、可靠性较高,在疏浚河口、港口,污水处理,油田采油,深海采矿,核能领域等众多领域有着广泛的应用^[1-3]。

气力提升技术的研究可追述到上世纪五六十年代,国内外学者在实验与数值模拟方面开展了大量研究。实验方面,1963年 Nicklin^[4]研究了影响小管径气力提升装置提升性能的因素。1985年 Kouremenos 和 Staicos^[5]实验研究了不同的提升管长度和浸没比对提升管内流型转变的影响。2000年之后,Kassab 和 Kandil 等^[6]对气力提升系统内气液固三相流进行实验研究,得到了淹没率和进气量等参数对气力提升系统提升固体颗粒的影响规律。Samaras 和 Margaritis^[7]提出了仅适用于气力提升泵内两相流的流型图,该图可方便反映气力提升泵的性能,直接观察流型转变。Moisisidis 等^[8]对短气力提升系统内的两相流动行为和流型转化进行了实验研究。胡东等^[9]研究了气孔数量对排液量、排沙量以及提升效率的影响,揭示了气力提升技术进气方式对其特性的作用机理及过程。左娟莉等^[10]通过改变进气面积和气孔分布方式对气力提升泵进行实验研究,研究发现,较小的进气面积提升效率较低,在同一进气面积下,气孔分布方式对气力提升泵提升效率影响不大。Wang 等^[11]利用高速摄像机和激光多普勒测速系统对气液两相流中气举泵的流动特性进行了研究,实验结果表明,大体积气泡混合物具有较强的加速水相能力。陈秋良等^[12]开展了泥沙提升效率实验,验证了气力提升技术在河道清淤过程中的应用效果,并探究了最佳提升效率所对应的进气速度。

数值计算方面,Nenes 等^[13]建立了运用于深井取水气力提升装置的数值模型,采用近似处理手段预测气力提升装置的出口端水流量,该模型适用于分析解决装置复杂部分的设计问题,如管径尺寸的选择、入口空气流量等。Kajishima 等^[14]数值模拟了深海采矿的大尺度气力提升装置的非稳态流动情况,通过引入密度与压强的隐式时间迭代方法,运用漂移流密度模型计算两相流动行为。Pougatch 和 Salcudean^[15]采用多流体的欧拉方法,对气液固三相

进行不同于前人理论的特别处理,其中将水作为连续相,而气泡和固体颗粒作为离散相,运用计算流体力学软件开展二维数值模拟计算,获得管内的各相流型、体积分数分布、速度分布的云图。Hekmat 等^[16]研究了分离器和尾水管对气力提升反应系统灵敏度的影响,模拟结果与实验结果吻合较好。Coughtrie 等^[17]采用 SST $k-\omega$ 湍流模型、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型、RSM 模型和过渡 SST 模型对气举式厌氧消化池进行了数值研究。

综上所述,目前对气力提升装置的研究多集中在浸没比、充气量、提升管管径等对提升效率的影响以及提升管内多相流流动特性等方面。但气力提升系统在深井取水、污水处理、石油开采、加速器驱动次临界反应堆中都有应用,这些领域中的液体分别以水、油以及液态重金属的形式存在,然而迄今为止,关于液体介质密度对气力提升泵的水力特性影响的研究非常匮乏。因此,本文基于 Fluent 软件对空气-水、空气-煤油、空气-水银的气力提升泵的水力特性进行较详细的数值模拟研究,以期对污水处理、深井采油、核能领域的气力提升技术的优化提供科学的理论基础。

1 物理模型

1.1 多相流模型

Fluent 提供了 VOF、Mixture 和 Eulerian 三种多相流模型,其中欧拉模型称为双流模型,该模型将不同的相处理成互相贯穿的连续介质,对气液两相流中每一相分别建立质量、动量、能量守恒方程,通过压力和相间交换系数的耦合来计算求解^[18]。本文将采用欧拉模型模拟研究气力提升泵中的多相流动。

质量守恒方程:

q 相的连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n (in_{pq} - in_{qp}) + S_q \quad (1)$$

动量守恒方程:

q 相产生的动量平衡为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \tau_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + in_{pq} \mathbf{v}_{pq} - in_{qp} \mathbf{v}_{qp}) + (\mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{lift,q} + \mathbf{F}_{vm,q} + \mathbf{F}_{td,q}) \quad (2)$$

能量守恒方程:

欧拉多相流模型中的能量守恒方程,体现为如下每相的分离焓方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \tau_q : \nabla \mathbf{v}_q - \nabla \cdot \mathbf{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n (Q + in_{pq} h_{pq} - in_{qp} h_{qp}) \quad (3)$$

式中: α_q 为第 q 相提积分额; ρ_q 为第 q 相的密度; \mathbf{v}_q 为第 q 相速度; in_{pq} 为第 p 相向第 q 相的相变质量源项; in_{qp} 为第 q 相向第 p 相的相变质量源项; S_q 为 q 相变质量源项之外的质量源项; \mathbf{g} 为重力加速度; ∇p 为压力梯度; \mathbf{R}_{pq} 为两相之间的作用力; \mathbf{v}_{pq} 、 \mathbf{v}_{qp} 为相间速度; \mathbf{F}_q 为外加质量力; $\mathbf{F}_{\text{lift},q}$ 为相间升力; $\mathbf{F}_{\text{vm},q}$ 为虚拟质量力; $\mathbf{F}_{\text{id},q}$ 为湍流耗散力; h_q 为第 q 相的焓; \mathbf{q}_q 为第 q 相的热量通量; Q 为通过相界面的相间能量传递; h_{pq} 、 h_{qp} 为相间焓值; p_q 为 q 相压力; τ_q 为第 q 相的应力张量。

本文研究的是常温下的气液两相流动,不必考虑能量方程,空气与水不存在质量上的交换,故 in_{pq} 、 in_{qp} 、 S_q 皆为 0。

1.2 湍流模型^[18]

本文研究的湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,其输运方程为:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

式中: ρ 表示混合物密度; G_k 表示平均速度梯度产生的湍流动能; G_b 表示由浮力引起的湍流动能; Y_M 表示脉动作用对湍流耗散率的影响; $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_{3\epsilon} = 0.09$; S_k 表示湍流能源项; S_ϵ 为 ϵ 源项; u_i 表示混合物速度; μ 表示混合物分子黏性; μ_t 表示混合物湍流黏性; σ_k 表示湍动能的湍流普朗特数,值为 1.0; σ_ϵ 表示 ϵ 的湍流普朗特数,值为 1.3。

1.3 计算模型边界条件及网格划分

Kim 等^[19]为将气力提升技术应用于碳燃料电池内熔化燃料的输送,以空气-水为例,实验研究了不同提升段管径、大浸没比对气力提升系统内流型

和提升性能的影响。实验采用如图 1 所示的装置图,储气罐中的空气经喷嘴及管路系统注入提升管管底,气流量通过质量流量控制器(KRO-4000)和流量计(MFM TSC-210)调节,并采用高速摄影机拍摄不同时刻提升管内气泡分布情况,提升出来的液体经斜管存储于储水桶中,用来测量提升液体的流量。

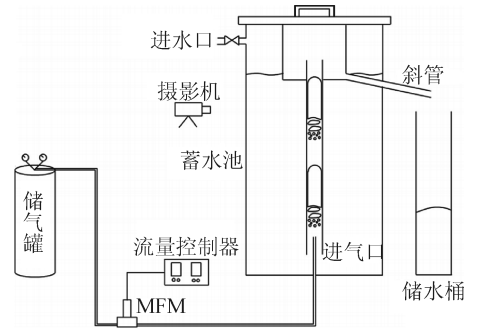


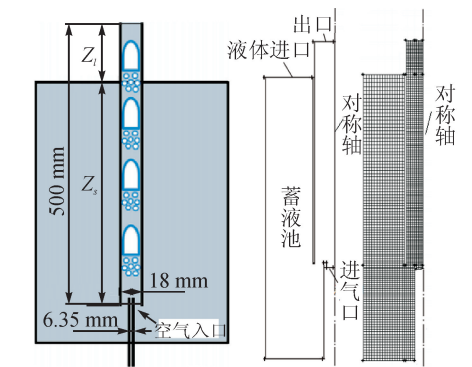
图 1 实验装置图^[19]

Fig. 1 Experimental apparatus system^[19]

以 Kim 实验模型为参考,建立本研究计算模型,图 2(a)为简化的气力提升装置示意图,其中提升管管长为 500 mm,管径为 18 mm,喷嘴管径为 6.35 mm。通过改变注入蓄液池的水量来达到浸没比不断改变的效果,浸没比 α 计算公式为:

$$\alpha = \frac{Z_s}{Z_l + Z_s} \quad (6)$$

式中: Z_s 为提升立管淹没在液面下的长度; Z_l 为提升立管高出液面的长度。



(a) 气力提升装置示意图 (b) 模型及网格划分图

图 2 气力提升装置及模型网格划分

Fig. 2 Air lift system and model meshing

首先,通过 Gambit 软件构建模型并进行网格划分。因提升管外部储液装置直径远大于提升管直径,且两者一般均为圆柱形结构,故将其简化为二维轴对称结构,示意图及网格划分如图 2(b)所示。由于提升管管径较小,且提升管段内会出现复杂二维多相流,为使复杂流态区域计算精确,可将对称轴

边界网格加密,以提高计算的精确度,并忽略注气管线对提升管内流场的影响。

本研究中,空气经喷嘴注入提升管底部,液相连续相为主项,气相分散相为次相。模拟算法采用的是 Phase Coupled SIMPLE。空气入口设置为质量流量入口;液体容器顶部与空气接触,液体容器的直径远大于提升管直径,液位保持不变,液体进口边界条件为压力入口,压力值为标准大气压;提升段出口与大气连通,边界条件为压力出口边界,压力值为标准大气压。边界条件的设置汇总于表 1,离散方式汇总于表 2。

表 1 边界条件设置

Tab.1 Boundary condition setting

边界	边界位置	边界类型	参数
空气入口	喷嘴	质量流量入口	实验设定值
液体入口	液体容器自由液面	压力入口	大气压
空气-液体混合物出口	提升管出口	压力出口	大气压
壁面	所有固体壁面	壁面	无滑移,绝热
对称轴	模型中心线	轴对称	无滑移

表 2 变量离散方式表

Tab.2 Variable discretization table

参数	离散格式
梯度	Least Squares Cell Based
动量	一阶迎风
体积分数	一阶迎风
湍流动能	一阶迎风
湍流耗散率	一阶迎风
时间项	一阶迎风

在进行数值模拟之前,需进行网格无关性分析,以保证计算结果的准确性,本文采用 3 种不同网格尺寸进行空气-水气力提升系统模拟,气体体积流量为 $0.0422 \text{ m}^3/\text{h}$,网格无关性分析如表 3 所示。由表可知,当网格总数为 88 360,最小网格尺寸为 0.3 mm 时,误差最小,模拟效果最好,故本研究选择最小网格尺寸为 0.3 mm 的网格。

表 3 网格无关性分析

Tab.3 Grid independence analysis

最小网格尺寸/mm	网格总数/个	提升液体体积流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		误差/%
		模拟值	Kim 实验值	
0.1	230 235	0.126 2	0.114 7	9.43
0.3	88 360	0.112 0	0.114 7	2.93
0.5	41 918	0.108 2	0.114 7	6.21

2 模型验证

采用 Kim 所做的提升管管径为 18mm 、浸没比为 0.9 的实验数据,验证本次数学模型的准确性。Kim 等人在处理实验数据时,将所有气体体积流量 Q_G 和液体体积流量 Q_L 两个流动变量通过式(8)、(9)转换为无量纲量 Q'_G 、 Q'_L 。表 4 给出了 Kim 实验数据与本次空气-水气力提升泵的模拟结果对比,列出了提升水体积流量无量纲量的实验与模拟之间的误差值,由表 4 可知实验数据与模拟数据吻合较好,故此模型可应用于气力提升系统数值模拟研究。

气体体积流量无量纲化:

$$Q'_G = \frac{Q_G}{A \sqrt{gD}} \quad (7)$$

液体体积流量无量纲化:

$$Q'_L = \frac{Q_L}{A \sqrt{gD}} \quad (8)$$

式中: A 为提升管横截面面积; g 为重力加速度; D 为提升管管径。

表 4 实验结果与模拟结果对比表

Tab.4 Comparison of experimental results and simulation results

Kim 实验值				模拟值		提升水体积流量误差/%
Q'_G	$Q_G/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	Q'_L	$Q_L/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	Q'_L	$Q_L/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	
0.062 9	0.024 2	0.051 4	0.019 8	0.058 7	0.022 6	14.1
0.094 1	0.036 2	0.214 4	0.082 5	0.221 7	0.085 3	3.4
0.109 7	0.042 2	0.298 1	0.114 7	0.291 0	0.112 0	2.4
0.124 9	0.048 1	0.368 7	0.141 9	0.349 0	0.134 3	5.4

3 不同液体气力提升泵水力特性分析

气力提升系统内气液两相流动特性与气液物性参数有关,本次研究在常温常压,提升管管径18 mm,大浸没比0.9的情况下,分别对空气-水银、空气-水、空气-煤油三种气力提升系统内的气液两相流动进行数值模拟研究,探讨空气注入量对提升立管总压降、提升液体体积流量和提升效率的影响。表5给出了空气、水银、水、煤油的物性参数。

表5 物性参数表

Tab.5 Physical parameters table

介质	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	表面张力/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
空气	1.225	0.000 017 89	
水银	13 529	0.001 523	0.484
水	998.2	0.001 003	0.072 8
煤油	780	0.002 4	0.026

3.1 总压降变化分析

气液两相流的压力降包括四部分,即重位压力降、摩擦阻力压力降、加速压力降和局部阻力压力降,亦即:

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_b \quad (9)$$

式中: ΔP 为总压力降; ΔP_g 为重位压力降(重力作用而引起的); ΔP_f 为摩擦阻力压力降(摩擦阻力引起的); ΔP_a 为加速压力降(流体速度变化引起的); ΔP_b 为局部阻力压力降(流动方向或管截面发生变化引起的)。

图3给出了不同液体下注入不同气体体积流量无量纲量 Q'_G 对提升管内总压降 ΔP 的影响。由图可知,总压降随注气量增加而单调递减,其中水银递减的速率最快,因煤油与水的密度相差不大,故其递减速率相当。

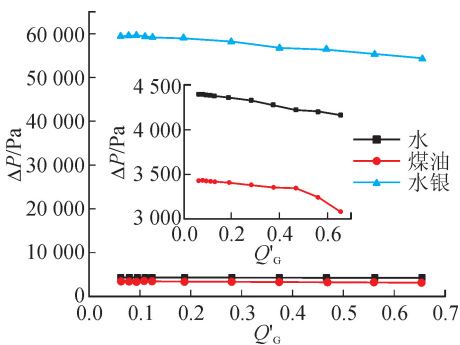


图3 提升管内总压降变化图

Fig.3 Diagram for total pressure drop in riser pipe

提升段内的总压降主要由重位压降、两相摩擦

压降和加速压降组成,其中重位压降由提升段高度、提升段内混合物密度决定;两相摩擦压降主要由混合物密度、两相混合物总质量流量等决定;加速压降主要由混合物密度变化等决定。因此,相同提升段高度和两相混合物总质量流量条件下,总压降主要取决于混合物密度。

在提升管段内,随着空气注入流量增大,两相混合物密度逐渐降低,总压降也降低。气液两相流密度差越大,两相混合密度递减速率越快,提升立管内总压降递减速率就越快。因此,在同一空气流量下,水银的总压降最大,其次是水,最小是煤油,故提升立管内液体密度越大,总压降越大。

3.2 提升液体流量变化分析

气力提升系统依靠向提升管内注入压缩气体产生提升压头,使提升段内的液体流动,产生流量,不同的空气注入量对液体提升有很大的影响。图4描述了不同气体体积流量无量纲量 Q'_G 下,三种不同液体——水、水银、煤油提升液体体积流量无量纲量 Q'_L 的变化规律。由图4可知,提升液体流量随着气体注入流量先快速增多,后增加缓慢。这是由于在初始状态下,空气经喷嘴注入到提升管段,空气密度远低于液体密度,在浮力作用下,空气气泡在液体中上升,提升管内液体出现流动,随着气体流量的进一步增加,提升管内空气份额增加,液体逐渐从提升管出口流出,即为提升液体流量。该提升流量随空气注入量的提升先迅速升高,随着注入空气的体积流量继续增加,空气在提升管内所占份额越来越大,导致提升流量增加越来越缓慢,甚至于下降。

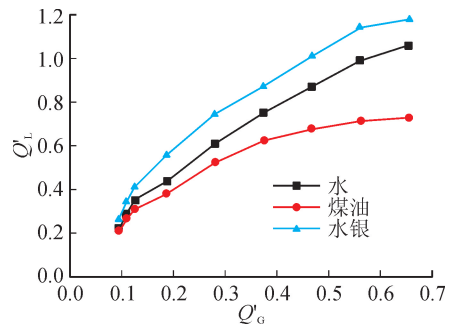


图4 提升液体流量变化图

Fig.4 Lifting liquid flow diagram

结合图3与图4可知,密度越大,提升管进出口压降越大,液体提升量越大。因此当注入空气流量相同时,水银提升的液体流量最大,水次之,煤油最小,说明对于不同液体,密度越大,提升液体流量越大。

图5给出了充入空气体积流量为 $0.048 \text{ l m}^3/\text{h}$

时,提升管内提升水、煤油、水银所对应的液体体积流量无量纲量 Q'_L 随时间 t 的变化图。图 6 给出了充入空气体积流量为 $0.048 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,提升管内气体从充入到液体刚被提出,空气-水的流动形态随时间的变化分布云图。通过图 5 及图 6 可看出,空气刚充入提升管时,其前沿位置为一个帽状的气泡,提升管内并没有液体排出;时间经过 1 s ,气体还未充满整个提升管,气泡最前沿依旧为帽状,但液体渐渐从提升管内排出,提升流量先快速增大,到达顶峰后开始下降,再经过一段时间波动,最终提升流量趋于稳定。

由于煤油与水的密度差值不是很大,图 5 中水与煤油的液体提升流量随时间的变化趋势相近,而水银密度与水、煤油相差甚远,图 5 中水银提升流量随时间变化的波动幅度较大。由图 5 可知,液体密度越大,被提升出来所需的时间越短,液体越易被提升。

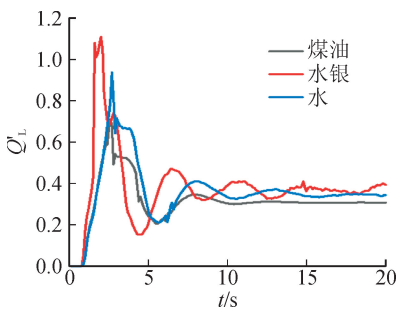


图 5 提升液体流量随时间变化图

Fig. 5 Diagram for lifting liquid flow over time

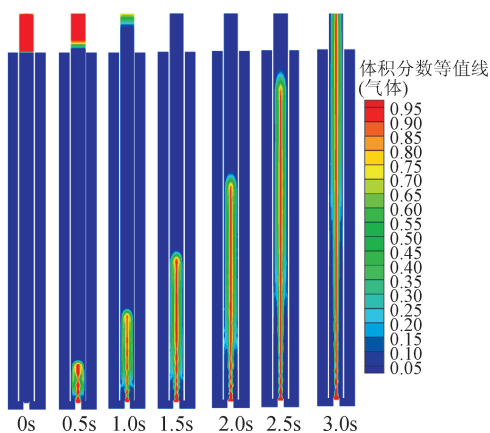


图 6 液体提升过程相位图

Fig. 6 Phase diagram for liquid lifting process

3.3 提升效率变化分析

提升效率是评测气力提升系统性能的关键指标,根据气力提升系统的工作原理,效率 η 应为气体在提升管出入口具有能量的差值与液体在提升管出口所具有能量的比值,本文采用 Niclin 效率公式^[4]:

$$\eta = \frac{\rho_L g Q_L Z_L}{P_a Q_G \ln(P_{in}/P_a)} \quad (10)$$

式中: ρ_L 为液体密度; P_a 为大气压强; P_{in} 为管道入口压强。

图 7 描述了不同气体体积流量无量纲量 Q'_G 下,水、水银、煤油三种液体的液体提升效率 η 的变化图。由图可知,随着气流量的增加,提升效率先显著增加后又降低。这是因为,提升管内气泡越来越多,空泡份额越来越大,起初气体产生浮力也越来越大,提升效率增加,后因提升管内两相密度越来越小,管内含气量过高,导致提升效率降低。对比不同液体的气力提升泵提升效率,水银提升效率最大,水次之,煤油最小。结合图 3 与图 7 可知,密度越大的气体,提升管进出口压降越大,提升液体越多,提升效率越大。

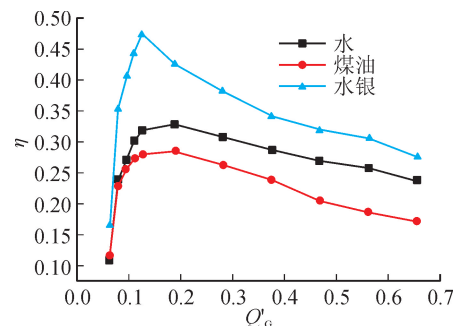


图 7 提升液体效率图

Fig. 7 Diagram for improving liquid efficiency

4 结论

本文通过 Fluent 软件对浸没比为 0.9,提升管径为 18 mm 时,空气-水、空气-水银、空气-煤油的气力提升系统进行了数值模拟,探讨了液体密度对气力提升系统提升性能的影响,研究发现:

1) 同一液体下,总压降随充气量单调递减;气液两相物流物质属性密度差越大,气体越易上升,总压降越大;

2) 同一液体下,提升管内液体提升流量随气体注入流量先快速增多,后增加缓慢;不同液体在同一气体流量下,水银提升的液体流量最大,水次之,煤油最小,液体提升流量随密度的增大而增大;

3) 同一液体下,随着气流量的增加,提升效率先显著增加后又降低;对比不同液体的气力提升泵提升效率,水银提升效率最大,煤油最小,提升效率随液体密度的增大而增大。

参考文献:

[1] 廖振方,陈德淑,邓晓刚,等. 三峡库区疏浚及清淤用机

- 电一体化成套气举装置[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(3):1-4.
- LIAO Zhenfang, CHEN Deshu, DENG Xiaogang, et al. Airlift used to dredging in the Three Gorges Reservoir-Region[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2003, 26(3):1-4
- [2] 刘三威. 提高气举采油系统效率应用基础研究[D]. 成都:西南石油学院, 2004.
- LIU Sanwei. The research on improving the efficiency of gas lift system[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.
- [3] ZUO J L, TIAN W X, QIU S Z, et al. Transient safety analysis for simplified accelerator driven system with gas-lift pump[J]. Progress in Nuclear Energy, 2018, 106:181-194.
- [4] NICKLIN D J. The air-lift pump: theory and optimisation [J]. Trans. Instn. Chem. Engrs., 1963, 41: 29-39.
- [5] KOUREMENOS D A, STAICOS J. Performance of a small air-lift pump[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1985, 6(3): 217-222.
- [6] KASSAB S Z, KANDIL H A, WARDA H A, et al. Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 131(1):273-281.
- [7] SAMARAS V C, MARGARIS D P. Two-phase flow regime maps for air-lift pump vertical upward gas-liquid flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(6):757-766.
- [8] MOISIDIS C T, KASTRINAKIS E G. Two-phase flow pattern transitions of short airlift pumps[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(5):680-685.
- [9] 胡东,唐川林,张风华,等. 进气方式增强气力提升作用的研究[J]. 水动力学研究与进展 A辑, 2012, 27(4): 456-463.
- HU Dong, TANG Chuanlin, ZHANG Fenghua, et al. Effect of air admission way on improving airlift[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(4): 456-463.
- [10] 左娟莉,李逢超,郭鹏程,等. 不同进气方式下气力提升泵水力特性理论模型与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):85-91.
- ZUO Juanli, LI Fengchao, GUO Pengcheng, et al. Theoretical model and verification of hydraulic characteristics of air lift pump under different air injection methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21):85-91.
- [11] WANG Z, KANG Y, WANG X, et al. Investigating the flow characteristics of air-lift pumps operating in gas-liquid two-phase flow [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26(2):219-227.
- [12] 陈秋良,巫世晶,李小勇,等. 基于气力提升技术的河道泥沙输送试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(5):397-403.
- CHEN Qiuliang, WU Shijing, LI Xiaoyong, et al. Experimental study on sediment transport in river channel based on pneumatic lifting technology [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(5):397-403.
- [13] NENES A, ASSIMACOPOULOS D, MARKATOS N, et al. Simulation of airlift pump for deep water wells [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1996, 74:448-456.
- [14] KAJISHIMA T, SAITO T. Numerical simulation of unsteady flow in air-lift pump[J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 1996, 39(3): 525-532.
- [15] POUGATCH K, SALCUDEAN M. Application of CFD methods to the analysis of the flow in air-lift pump[C]// Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California, USA, 2007:1-11.
- [16] HEKMAT A, AMOOGHIN A E, MORAVEJI M K. CFD simulation of gas-liquid flow behaviour in an air-lift reactor: determination of the optimum distance of the draft tube[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(7):927-945.
- [17] COUGHTRIE A R, BORMAN D J, SLEIGH P A. Effects of turbulence modelling on prediction of flow characteristics in a bench-scale anaerobic gas-lift digester [J]. Bioresource Technology, 2013, 138: 297-306.
- [18] ANSYS Inc. Ansys fluent theory guide [M]. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc, 2011.
- [19] KIM S H, SOHN C H, HWANG J Y. Effects of tube diameter and submergence ratio on bubble pattern and performance of air-lift pump[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 58:195-204.

(责任编辑 周 蓓)