

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.06.008

# 气力提升管内流型识别的实验研究

王霞光, 傅绍棠, 徐旭

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 以压缩空气、水和麦饭石陶瓷颗粒作为实验介质, 利用高速摄像仪对气力提升管内的气液两相流流型及气液固三相流流型进行可视化分析识别。实验结果表明, 采用高速摄像技术有效识别了气力提升管内的流型, 观察到气液两相流中存在着4种流型: 泡状流、弹状流、泡沫流、环状流。以气液两相流流型特征为基础参考, 将观察到的气液固三相流流型归分为弹旋流、旋涡流、波浪流、聚泡流和环柱流5种。并对各流型间的转变机理进行了分析阐述。

**关键词:** 气力提升管; 气液两相流; 气液固三相流; 流型

**中图分类号:** TD432

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2017)06-0043-06

## An Experimental Study on Flow Pattern Identification of Air-Lift Pipes

WANG Xianguang, FU Shaotang, XU Xu

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The experimental medium are compressed air, water and medical stone ceramic particles in this paper. The gas-liquid two-phase flow pattern and the gas-liquid-solid three-phase flow pattern in the air-lift pipe were visualized analyzed and identified by high-speed camera technology. The results of experiment show that the high-speed camera technology can effectively identify the flow pattern. It is observed that there are four kinds of flow patterns in gas-liquid two-phase flow: bubble flow, slug flow, churn flow and annular flow. Base on the flow pattern characteristics of gas-liquid two-phase flow, the gas - liquid - solid three-phase flow pattern can be divided into five flow patterns: slug-spiral flow, vortical-spiral flow, wave flow, coalesced churn flow, and annular column flow. In addition, the mechanism of the transition between the flow pattern is discussed.

**Keywords:** air-lift pipe; gas-liquid two-phase flow; gas-liquid-solid three-phase flow; flow pattern

## 1 研究背景

气力提升装置 (air-lift device) 也称气举, 是一种以压缩空气为动力介质, 利用提升管进行输送液体或浆体的流体机械装置<sup>[1-2]</sup>。气力提升装置具有结构简单、成本低、工作安全可靠且易于维护等优点, 已被广泛应用于河道、码头的清淤, 深井取水和水力

开采等领域<sup>[3-4]</sup>。但因对气力提升装置中气力提升管内的流动状态、流型特征以及流型间相互转变机理的研究较为缺乏, 而无法进一步提高提升效率。

目前, 对于气力提升管中气液两相流流型的研究与分类, 国外学者研究较多。比如: S. Z. Kassab 等<sup>[5]</sup>通过对不同淹没率和不同长度的气力提升管进行了试验研究, 并在此基础上建立了能够对泡状流、弹状

收稿日期: 2017-07-12

基金项目: 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2017B686)

作者简介: 王霞光 (1990-), 男, 湖南娄底人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高效射流理论及应用,

E-mail: happyapples8888@163.com

流、搅拌流和环状流的液体体积流量进行预测的理论模型。T. M. Charalampos 等<sup>[6]</sup>采用电导率探针对气力提升装置在不同淹没率和进气量下的气液两相流型进行了试验研究,得到了不同运行参数下(即进气量和淹没率)的流型转变图。

国内学者对于气液两相流流型的研究主要集中在化学工业、石油工程等领域。随着采矿工程、冶金工程以及能源工程等施工过程中均涉及到气液固三相流,对气液固三相流的研究变得越来越重要。而气力提升装置是以输运气液固三相流为主的流体机械,由于固相颗粒的存在使得气液固三相流的流型比气液两相流更为复杂。C. H. Yoon 等<sup>[7]</sup>通过对气力提升装置中气力提升管处于气液固三相流时的流动特征进行理论研究,建立了考虑气液固三相的瞬变流体动力学模型。S. Kumar 等<sup>[8]</sup>采用差压传感器对不同固体浓度、液相速度和气相速度下的鼓泡塔内气液固三相流的流型转变机理进行了实验研究,得知当固体浓度高时,会对流型转变造成影响。国内学者对于气液固三相流的研究主要集中在流化床、搅拌槽等,而对气力提升装置方面的研究甚少。

研究气力提升装置中气力提升管内的流型,不仅能为建立气力提升装置理论模型提供参考,还能对气力提升装置的设计进行优化,故本文主要针对气力提升管内的气液两相流和气液固三相流的流型进行研究,以为后续流型的研究提供参考依据。

## 2 实验系统及实验方法

图1为实验用小型气力提升装置示意图。

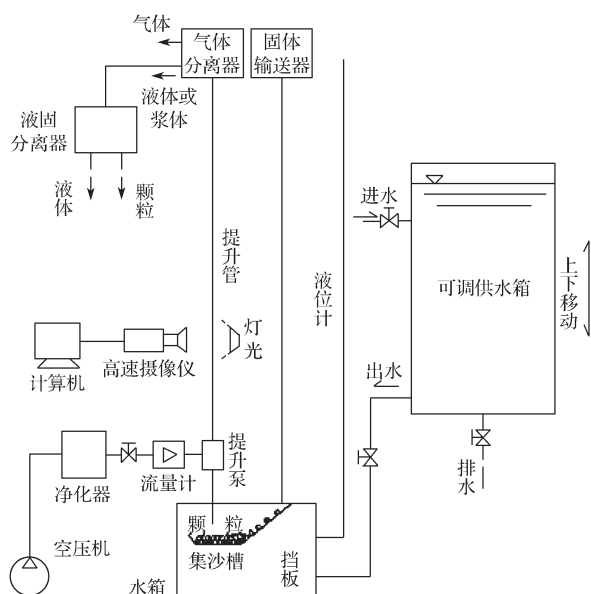


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental devices

为了便于利用高速摄像机记录气力提升装置中气力提升管内的气液两相流型和气液固三相流型的变化过程,从而分析两相流和三相流的流型特征以及各流型间的转变机理,课题组在实验室内建立了小型气力提升装置。该装置主要是由高速摄像系统,气力提升系统,能够提供满足实验要求的水、压缩空气、固体颗粒等的系统组成。

实验开始前启动空压机,使压缩空气进入净化器中降絮除尘。然后调节出水阀门开关,使提升管内的液面能够达到液位计上已设定的刻度,即调节所需的淹没率 $\gamma$ (指从进气孔到提升管液面距离与进气孔到提升管管口距离的比值)。同时调节气体流量(即进气量 $Q_G$ ,可通过式 $V_G=Q_G/A$ 得到气相流速 $V_G$ ,其中 $A$ 为管道截面积。)阀门开关使压缩空气进入提升泵中形成气力提升。此时的气力提升管内只有气液两相,当气液两相到达气体分离器时,气相随即排入大气中,液相经液固两相分离器进行回收与利用。最后调节输送固体颗粒的阀门开关,提升管内开始由气液两相转变成为气液固三相,固相颗粒也可以在液固分离器中进行回收与循环利用。

实验过程中使用的提升管为高透明度的有机玻璃管。因Vision Research出厂的Phantom Miro M310型高速动态摄像机,带有一款可对图片进行分析处理的图像记录分析软件(PCC)而被应用在本实验中。实验时,先将三基色柔光灯和高速摄像机的位置进行调整,使其尽量呈直角布置,然后打开三基色柔光灯,细调高速摄像机的镜头焦距,尽量保持拍摄平面平行于提升管的轴心所在平面,开始拍摄。由于麦饭石陶瓷颗粒的形状基本为球体,故选用粒径为2 mm的麦饭石陶瓷颗粒作为本实验中的固体颗粒。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 气液两相流型

图2所示为垂直管中常见的4种气液两相流的经典流型<sup>[9-10]</sup>。

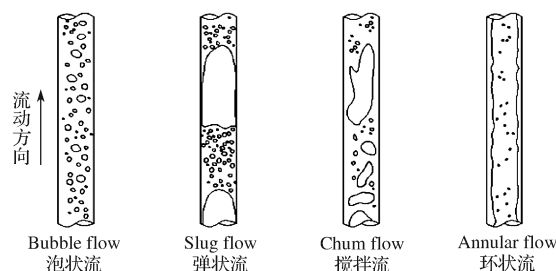
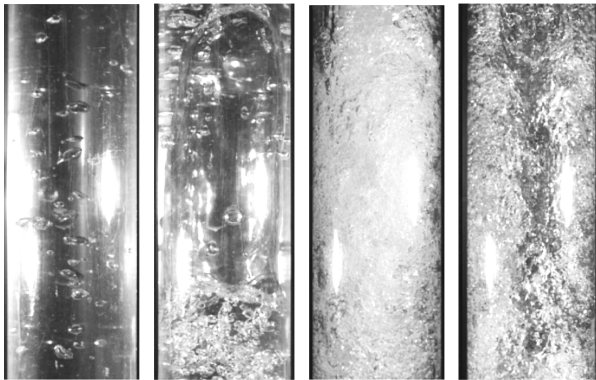


图2 垂直管向上流动流型

Fig. 2 Vertical tube flow upward flow pattern

通过高速摄像机对气力提升管内处于气液两相

流时进行拍摄, 并利用其自带的图像记录分析软件 PCC 对图像进行分析, 得到了气力提升系统处于气液两相流时的 4 种流型, 如图 3 所示。



a) 泡状流 b) 弹状流 c) 泡沫流 d) 环状流

图 3 拍摄到的气液两相流流型

Fig. 3 The gas-liquid two-phase flow pattern is captured

与图 2 中经典流型相比, 除一种流型差别较大外, 其余 3 种流型基本保持一致。将差别较大的流型称之为泡沫流, 即将气液两相流流型称为: 泡状流、弹状流、泡沫流、环状流, 各流型的主要特征如下:

1) 泡状流。该流型通常出现在气体流速  $V_G$  小于 0.88 m/s 时, 主要表现为液相中分布着大小不一的气泡, 使气相变成分散相, 液相为连续相。

2) 弹状流。该流型中气泡的直径与提升管管径相近, 形状与子弹头相似, 尾部有大量小气泡伴随。气相仍为离散相, 液相为连续相, 弹状气泡与液相之间呈现出周期性变化。在弹状气泡快速上升过程中出现下降液膜, 且有少量小气泡被包裹在液膜中。

3) 泡沫流。该流型中气液两相运动剧烈且混合湍动快速上升。刚开始气泡的变形比较剧烈, 随后出现大量的小气泡, 且小气泡的形状和大小基本保持一致, 如同泡沫。上升和下降运动的液膜同时存在, 但随着气相流速的逐渐增大, 液膜的下降运动时间相对减少。

4) 环状流。该流型中气相沿气力提升管中心部分向上运动, 在管壁附近形成大量小气泡, 同时夹带丝状等不规则形状的液膜, 气液两相由离散变成基本连续, 且只存在上升运动的液膜。

4 种流型中, 泡状流和弹状流的特征与经典流型中的特征基本吻合, 其中泡沫流与搅拌流差别最大, 经典流型搅拌流中的气泡形状比较不规则, 出现混乱状态, 流型的形态变化较多, 而在本实验中呈现出的泡沫流, 气泡的主要特征为形状和大小基本一样的小气泡。环状流与经典流型相比也有一定的区别, 主要表现为吸附在气力提升管管壁上的液相厚度上。

这可能是由于气力提升装置中是以压缩空气作为气相, 而经过提升泵的混合作用, 气相与液相的碰撞瞬间变得更加剧烈, 故而导致了这种差异。

对气液两相流中各流型随淹没率和气相流速的变化规律进行分析, 可以得到如图 4 所示的气液两相流流型转变图, 图中横坐标为淹没率, 纵坐标为气相流速。

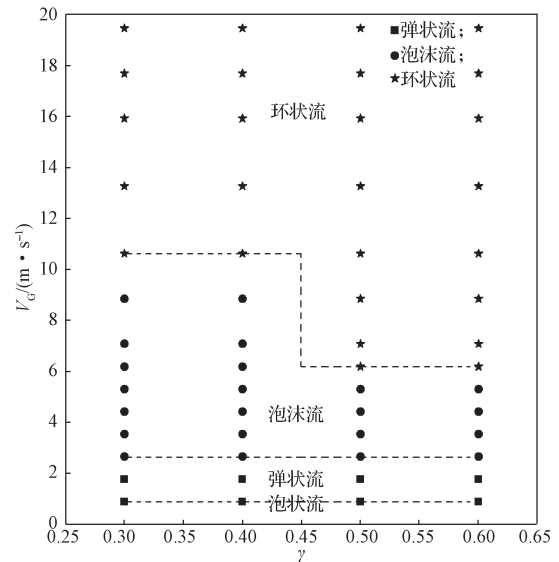


图 4 两相流流型转变图

Fig. 4 Flow pattern transition of two-phase flow

从图 4 中可以看出, 在相同淹没率下, 气相流速是影响流型的主要因素之一。随着气相流速的增大, 流型的转变顺序依次为: 泡状流、弹状流、泡沫流和环状流。当气相流速相同时, 淹没率对泡状流和弹状流的影响很少, 几乎可以忽略。但当淹没率达到 0.5 以上, 气相流速达到 6.19 m/s 时, 便会触发泡沫流向环状流转变。

### 3.2 气液固三相流流型

从已有的研究中可以得知, 管内三相流流型的变化现象并不是随机出现, 在相同的工况条件下, 管内的流型现象具有可重复性, 故需对流型进行归分<sup>[11-12]</sup>。

由于固体颗粒的加入, 使得提升管内的流型发生变化。以经典两相流流型特征作为参考, 对气相、固相和液相的混合流动特征进行分析, 从而划分气液固三相流流型, 并归分为 5 种流型 (如图 5 所示), 各流型的主要特征如下。

1) 弹旋流。该流型的特征与气液两相流中的弹状流比较相似, 均呈现出直径接近气力提升管内径的子弹状气泡, 尾部也伴随着大量小气泡, 且运动轨迹为旋转上升, 故名弹旋流。相邻子弹状气泡之间存在稳定的液相段。管壁上附着有包裹小气泡和固体颗粒的下降液膜, 且液膜中出现悬停的固体颗粒。

2) 旋涡流。该流型中前端携带着固体颗粒和小气泡作旋涡状旋转, 尾端作类似于“S”形旋转上升运动, 故名旋涡流<sup>[13]</sup>。气液固三相为分散相, 稳定的液相段已经不存在, 仍旧有包裹小气泡和固体颗粒的下降液膜且液膜中出现悬停的固体颗粒。

3) 波浪流。该流型中前端以液丝的形式均匀分布在气力提升管内, 尾端拖曳着小气泡和固体颗粒, 在管内做类似于波浪的上升运动, 故名波浪流。气液两相开始变得基本连续, 固相比较为分散, 且只出现上升液膜。

4) 聚泡流。该流型中类似于气液两相流中的泡沫流, 管内出现大量小气泡聚集, 大量固体颗粒被包裹在聚集气泡中, 故名聚泡流。

5) 环柱流。该流型中气相在气力提升管中间发生聚合, 形状与柱体状相似, 管壁上形成上升液膜, 其向上速度比中心部分较慢, 且携带固体颗粒和小气泡或不规则形状气泡一起向上运动, 故名环柱流。当淹没率为 $\gamma=0.6$ 、气相流速为 $V_G=19.46$  m/s时, 会出现图5f中的半环情况, 因其特征与环柱流基本相同, 故都统归为环柱流。

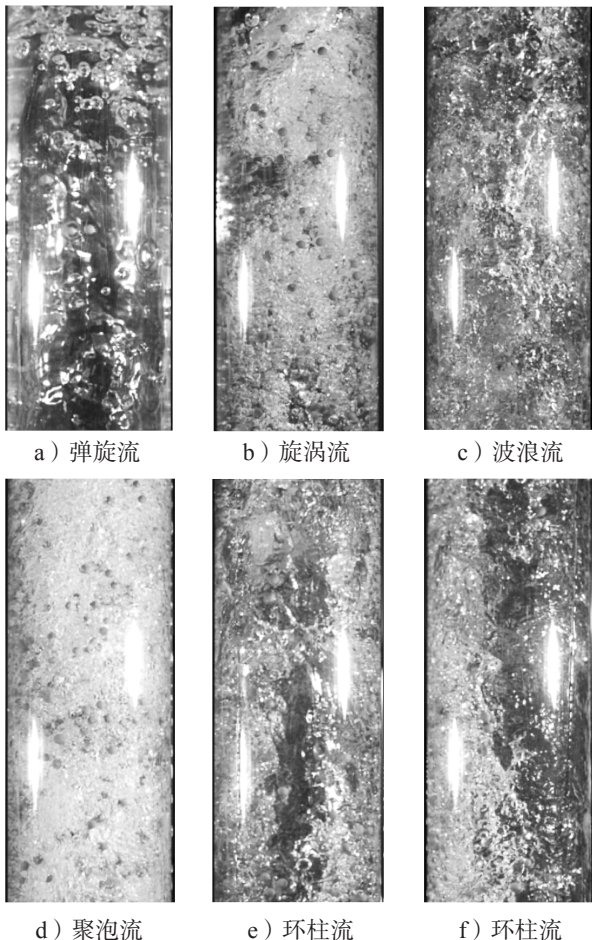


图5 拍摄到的气液固三相流型

Fig. 5 Gas-liquid-solid three-phase flow pattern captured

对气液固三相流中各流型随气相流速和淹没率的变化规律进行分析, 可以得到如图6所示的气液固三相流型转变图, 图中纵坐标为气相流速, 横坐标为淹没率。

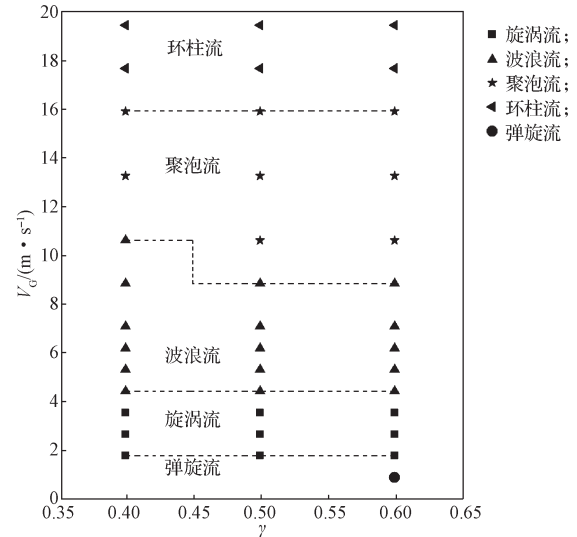


图6 三相流流型转变图

Fig. 6 Flow pattern transition of three-phase flow

由图6所示三相流流型转变图中可以看出, 当淹没率为0.4, 0.5且气相流速为0.88 m/s时, 未出现包含固体颗粒的流型, 可以认为固体颗粒没能被提升; 而当淹没率为0.6、气相流速为0.88 m/s时, 才会出现拖曳固体颗粒的弹旋流, 说明此时的气相流速是该淹没率下提升固体颗粒的临界值。出现这一结果可能有两个方面的原因: 一是淹没率的增大, 引起了气力泵的混合作用加大, 从而使得气相动能与液相之间的能量转化得到提高, 对固体颗粒形成的拖曳力恰好与固体颗粒的重力相近。再加上此时的流型为弹旋流, 而弹旋流中大气泡即子弹状气泡的直径与气力提升管的内径大小相当。这种子弹状大气泡一旦向上运动便会在其尾部形成较大的负压, 固体颗粒在重力与拖曳力相近的情况下很容易跟随液相一起被吸入其中, 最终使得液相和固体颗粒依靠拖曳力和负压一起开始向上运动, 直至被提升出管口。二是当淹没率为0.6时, 液面到提升管管口的距离相比淹没率为0.4, 0.5时的要短, 势必会增大提升管管口的压力, 气相在与液相发生能量转化的过程中, 会在压力的作用下出现极短的等待时间, 直到气相压力与管口压力达到平衡, 之后便以气泡的形式向上运动。而在这段等待时间内, 气相会将自身部分能量传递给固体颗粒, 使固体颗粒恰好能够随着液相一起向上运动, 从而形成临界提升效果。

### 3.3 流型转变分析

当气力提升管处于气液两相流时, 在淹没率相

同的情况下, 随着气相流速的逐渐增大, 流型开始由泡状流、弹状流、泡沫流向环状流转变。在气相流速较低时, 气液两相混合过程中基本不会发生碰撞。其原因是液相会在与气相接触的表面间存在着分子作用力, 即表面张力。而因此时气相的流速不是很大, 其本身所具有的能量还不足以打破液相分子之间的表面张力, 导致形成的小气泡分布在液相中, 即为泡状流。当加大气相流速时, 虽然气相所具有的能量得到了提高, 但是仍旧不具备破坏分子间表面张力的能力, 与此同时, 小气泡的数量开始增多, 大多数小气泡会在表面张力的作用下发生融合, 从而形成子弹状大气泡往上升, 在这个过程中会有少量气泡没能融合在一起, 导致子弹状气泡的尾部跟着一些小气泡, 呈现出弹状流现象。当气相流速进一步增大, 此时的气相与液相在混合时会发生剧烈碰撞, 碰撞瞬间所释放的能量<sup>[14]</sup>远超过表面张力, 使得部分气泡发生严重变形, 大部分形成具有一定能量的小气泡。而这些小气泡会依靠自身具有的能量形成小气泡群提升现象, 即泡沫流, 当气相流速不断增大到气相与液相还没来得及充分混合时, 就迅速分离。此时, 气相会在气力提升管中心部分形成气相柱, 而气相柱与附近接触部分发生剧烈摩擦, 会使液相形成丝状, 管壁附近的各相运动速度比中心区域的低, 使其出现类似于环状的特征, 即环状流。

而在气力提升管处于气液固三相流时, 流型则依次从弹旋流、旋涡流、波浪流、聚泡流到环柱流转变。以淹没率为0.6时, 不同气相流速下气液固三相流的流型转变进行分析。当保持淹没率为0.6, 低气相流速时, 此时气力提升管内的压力比淹没率为0.4和0.5工况下的高, 气液接触面间还存在着表面张力, 且固体颗粒的提升量不多。虽然气相流速低所具有的能量也低, 但形成小气泡的数量较多。这些小气泡会在液相分子间表面张力和压力的作用下不断发生碰撞与融合, 大部分小气泡开始融合在一起形成了子弹状大气泡, 小部分小气泡则跟随在子弹状气泡尾部。在提升过程中, 当子弹状气泡向上运动时, 便会在气泡尾部形成负压, 造成子弹状气泡尾部会被各相迅速补充。因固体颗粒的存在, 在补充过程中可以看到碰撞时形成的旋转现象, 即弹旋流现象。当增大气相流速, 固体颗粒的提升量增多, 气相由于三相之间的混合程度加大, 而以小气泡的形式分散在液相中, 并出现了向上转动的旋涡, 在这过程中部分气泡形状也变得不规则, 旋涡头部携带较多的固体颗粒, 其提升速度较快, 尾部的气液

固三相部分会作“S”形状旋转着接上, 形成旋涡流现象。当气相流速进一步增大, 气液固三相混合程度继续加大, 三相混合较均匀, 此时的液相会在气相的作用下产生犹如波浪的现象, 固体颗粒会在尾端被拖曳着向上提升, 即波浪流现象。当继续增加气相流速时, 三相混合变得更为剧烈, 气相开始在提升管内形成大量的小气泡, 使得三相分布接近均匀, 即为聚泡流现象。当气相流速保持进一步增大时, 气相会因提升管内的提升速度过快, 而集中在提升管中心部分形成气柱, 且气柱会在提升管管壁附近形成边界层, 气相对固相、液相间的向上推力较大, 固体颗粒主要集中在边界层提升, 液相在这个过程中也会出现丝状或不规则的形状当气相流速再继续增加时, 就会出现图5f中只有半环的情况, 即为环柱流。

## 4 结语

本文借助搭建的小型室内气力提升装置, 以压缩空气、水和麦饭石陶瓷颗粒作介质, 采用高速摄像技术对气力提升管内的气液两相流流型及气液固三相流流型进行了可视化的识别实验研究。通过对不同淹没率和气相流速下的实验结果进行分析表明, 高速摄像技术能有效地对气力提升管内的流型进行识别。在气力提升管处于气液两相流时, 可以观察到4种流型: 泡状流、弹状流、泡沫流和环状流。而在气力提升管处于气液固三相流时, 可以观察到5种流型: 弹旋流、旋涡流、波浪流、聚泡流和环柱流。此外, 课题组获取了固体颗粒在淹没率为0.6时的临界提升气相速度。

### 参考文献:

- [1] 杨林, 唐川林, 张风华. 地下矿产钻孔水力开采技术及其应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 662-665.  
YANG Lin, TANG Chuanlin, ZHANG Fenghua. The Technology of Hydraulic Borehole for Underground Mining and Its Application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4): 662-665.
- [2] 唐川林, 胡东, 杨林. 气举工作特性的实验与应用[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 347-352.  
TANG Chuanlin, HU Dong, YANG Lin. Experimental and Application of the Air-Lift Performance[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 347-352.
- [3] 胡东, 唐川林, 张风华, 等. 钻孔水力开采用气

- 力提升装置模型的建立及实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 522-527.
- HU Dong, TANG Chuanlin, ZHANG Fenghua, et al. Theoretical Model and Experimental Research of Airlift Device in Borehole Hydraulic Jet Mining[J] Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 522-527.
- [4] 胡东, 王晓川, 唐川林, 等. 气力提升理论模型建立及验证[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(5): 1074-1081.
- HU Dong, WANG Xiaochuan, TANG Chuanlin, et al. Modeling and Validation of an Airlift Lifting System[J] Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2016, 30(5): 1074-1081.
- [5] KASSAB S Z, KANDIL H A, WARDA H A, et al. Air-Lift Pumps Characteristics Under Two-Phase Flow Conditions[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2009, 30(1): 88-98.
- [6] CHARALAMPOS T M, ELEFATHERIOS G K. Two-Phase Flow Pattern Transitions of Short Airlift Pumps[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(5): 680-685.
- [7] YOON C H, PARK Y C, LEE D K, et al. Numerical Analysis of Solid-Liquid-Air Three-Fluid Transient Flow for Air Lift System[C]//Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon: [s. n.], 2004: 23-28.
- [8] KUMAR S, SRINIVASULU N, MUNSHI P, et al. Flow Regime Transition Identification in Three Phase Co-Current Bubble Columns[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2013, 91(3): 516-523.
- [9] GUET S, OOMS G, OLIEMANS R V A. Influence of Bubble Size on the Transition from Low-Re Bubbly Flow to Slug Flow in a Vertical Pipe[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2002, 26(6/7): 635-641.
- [10] CHARALAMPOS T M, ELEFATHERIOS G K. Two-Phase Flow Pattern Transitions of Short Airlift Pumps[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(5): 680-685.
- [11] ANIL M, AGARWAL V K, ALAM M S, et al. CFD Modeling of Three-Phase Bubble Column: 1. Study of Flow Pattern[J]. Chemical & Biochemical Engineering Quarterly, 2007, 21(3): 197-205.
- [12] DÍEZ L, RAUH C, DELGADO A. Improvement of Three-Phase Flow Numerical Simulations by Means of Novel Hybrid Methods[J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(2): 277-283.
- [13] 邱耀德, 罗彬文, 彭高. 水平突变管内流动形态的数值模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 48-51.
- QIU Yaode, LUO Binwen, PENG Gao. The Numerical Simulation of Flow Pattern in Horizontal Mutation Pipe[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 48-51.
- [14] 张风华, 徐俊超, 唐川林, 等. 壅塞管直径对壅塞空化器空化特性的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(5): 24-27.
- ZHANG Fenghua, XU Junchao, TANG Chuanlin, et al. Effect of Choke Pipe Diameter on the Cavitation Characteristics of Chocking Cavitator[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 24-27.

(责任编辑: 申剑)