doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.012

# 泵站虹吸式出水管虹吸形成过程气液两相流数值模拟*

王晓升[1,2]　冯建刚[2]　陈红勋[1]　卜立峰[2]　谭琳露[2]

(1.上海大学上海市应用数学和力学研究所,上海 200072;2.河海大学水利水电学院,南京 210098)

**摘要**:为分析虹吸式出水管虹吸形成过程中气液两相流动,基于各向同性假设,采用欧拉多相流模型与 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对一泵站虹吸式出水管虹吸过程中的气液两相流进行了数值模拟。结果表明:虹吸过程中,在虹吸管驼峰段和下降段易产生上、下气囊,对虹吸作用的完成有不利影响。来流流量是影响虹吸形成时间的主要因素,水力驱气阶段和水力挟气阶段可分别用不同的幂函数来表达时间与流量的关系。

**关键词**:虹吸式出水管　气液两相流　虹吸形成时间　数值模拟

**中图分类号**:TV131.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)05-0078-06

## 引言

虹吸式出水管是泵站的一种出水布置型式,由于其停机断流非常方便可靠,在扬程较低的立式和斜式泵站中有广泛的应用。在泵站起动时,从水泵开机到虹吸管虹吸作用完成的过程称作虹吸形成过程,此过程包括水力驱气、水力挟气和虹吸稳定流 3 个阶段[1],水泵排出的水流需首先填充管道上升段的空间,期间水面逐渐上升,并驱动管道内空气从出水池排出,水流翻过驼峰向管道下降段溢流,形成水气混合出流,管道内的空气在水流的挟带下逐渐排出,最终在管道内形成满管稳定虹吸流[2]。在虹吸形成过程中,管内流态、管壁压力和水泵扬程等随着时间的变化亦发生复杂的变化,并且当虹吸形成时间过长或者最终未能形成较好的满管流动时,管内水力损失增加,泵站的稳定运行亦会受到影响,因此,研究虹吸式出水管的虹吸形成过程有着重要的意义。

对于虹吸式出水管的水力特性研究国内外学者已作了较多的工作[3-11]。虹吸形成过程中虹吸管内的气液两相流动特性对虹吸管虹吸作用的完成有着重要的影响,然而对此方面的研究却鲜见报道。

本文在前人研究的基础上,基于流体计算软件 ANSYS CFX,对虹吸式出水管虹吸形成过程中的三维气液两相流动过程进行数值模拟,针对虹吸形成过程中的管内气液流动特性、虹吸管驼峰顶部的压力变化过程、虹吸形成时间特性等问题展开研究。

## 1　问题描述

某排水泵站共安装 6 台混流泵机组,其中 2 台采用虹吸管出水形式(其余采用平直管出流),本文选择有代表性的其中 1 台水泵机组作为研究对象,该水泵机组选用 1200HLB-12 型立式混流泵,设计流量 $Q_d = 3.00\ m^3/s$,扬程 $H = 13.0\ m$,为保证虹吸管出口为淹没出流,出水侧加设了挡水墙,墙顶高程为 3.7 m,挡水墙与出水管侧向布置,与出水侧端墙相连。虹吸式出水管布置如图 1 所示,虹吸式出水管的主要设计参数见表 1。

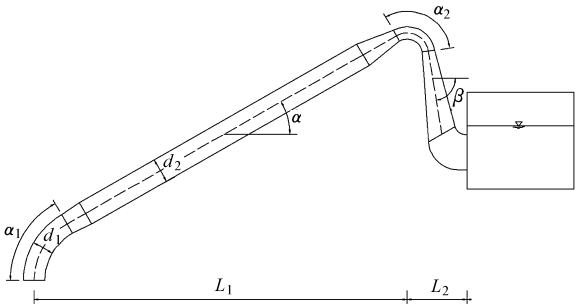


图 1　虹吸式出水管示意图

Fig. 1　Sketch of siphon outlet

## 2　计算模型及方法

### 2.1　气液两相流模型

泵站虹吸式出水管虹吸过程是复杂的气液两相非定常流动,采用欧拉多相流模型可以对其流动过程进行数学表达。假设流体为各向同性流体,忽略

收稿日期:2013-06-30　修回日期:2013-09-20

*国家自然科学基金资助项目(51009051)和上海市力学在能源工程中的应用重点实验室开放基金资助项目

**作者简介**:王晓升,博士生,河海大学实验师,主要从事工程计算流体力学研究,E-mail:wxsh83@163.com

**通讯作者**:冯建刚,副教授,主要从事泵站工程研究,E-mail:jgfeng@hhu.edu.cn

**表 1　虹吸式出水管主要设计参数**

**Tab. 1　Main design parameters of siphon outlet**

| 虹吸管 | 出水管尺寸 | 设计值 |
|---|---|---|
| 弯管段 | 管道直径/m | 1.2 |
| | 弯管段包角/(°) | 60 |
| | 虹吸管进口高程/m | -5.072 |
| 上升段 | 管道直径/m | 1.4 |
| | 上升角/(°) | 30 |
| 驼峰段 | 驼峰断面高度/m | 0.7 |
| | 驼峰断面宽度/m | 1.4 |
| | 驼峰段包角/(°) | 112 |
| | 驼峰断面底部高程/m | 8.62 |
| 下降段 | 下降角/(°) | 82 |
| 出口段 | 出口断面高度/m | 2.0 |
| | 出口断面宽度/m | 1.4 |
| | 出口底高程/m | 1.2 |
| | 出水池水位/m | 3.7 |
| 水平长度 | 进口至驼峰顶部/m | 20.943 |
| | 驼峰顶部至出口/m | 3.362 |

相间质量交换与动量传递,质量力仅考虑重力作用。则其守恒方程可简化为:

连续方程

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

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{u}) + \nabla (\rho \boldsymbol{u} \otimes \boldsymbol{u}) = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}) \tag{2}$$

其中　$\rho = \alpha' \rho_l + \beta' \rho_g$　$\mu = \alpha' \mu_l + \beta' \mu_g$　$\alpha' + \beta' = 1$

式中　$\alpha'$、$\beta'$——液相、气相的体积分数

$\boldsymbol{u}$——速度矢量　　$g$——重力作用质量力

$p$——压力　　$\rho$——混合密度

$\mu$——混合动力粘度系数

下标 $l$、$g$ 分别表征液相和气相。

## 2.2　湍流模型

将瞬态的 N-S 方程对时间作平均即可得到有雷诺应力项的 RANS 方程,为求解方程,选用 RNG $k-\varepsilon$湍流模型封闭雷诺应力项。

RNG $k-\varepsilon$ 模型是基于重正化群理论的统计方法推导得出,它改进了标准 $k-\varepsilon$ 模型的耗散方程并考虑了湍流漩涡的影响,从而提高了强旋流动的模拟精度[12-13]。描述多相流混合相的 $k-\varepsilon$ 控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla (\rho \boldsymbol{u} k) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla (\rho \boldsymbol{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^{*} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

其中　$\mu_{\mathrm{eff}} = \mu + \mu_t$　　$\mu_t = C_\mu \rho \dfrac{k^2}{\varepsilon}$

$$G_k = \mu_t [\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}] \nabla \boldsymbol{u}$$

$$C_{2\varepsilon}^{*} \equiv C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \dfrac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + 0.012 \eta^3}$$

$$\eta \equiv Sk/\varepsilon \qquad S = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{\mathrm{T}})$$

式中　$k$——湍动能　　$\varepsilon$——耗散率

$\mu_{\mathrm{eff}}$——有效混合粘度　　$\mu_t$——涡粘系数

$G_k$——由于粘性力导致的湍动能产生项

$S$——平均应变率张量系数

常数项有:$C_\mu = 0.0845$,$C_{1\varepsilon} = 1.42$,$C_{2\varepsilon} = 1.68$,$\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.75$,$\eta_0 = 4.38$。

## 2.3　网格技术

为保证网格质量,采用六面体结构化网格对计算区域进行划分。由于虹吸管上升段为圆形截面,上升段末端至驼峰段之间过渡段由圆形截面逐渐过渡为矩形截面,采用“O”型网格对虹吸管作结构化网格处理。通过网格无关性验证计算,最后确定网格单元数为 341 744 个。

## 2.4　定解条件

虹吸管在虹吸形成过程中,水泵流量受到扬程变化、水气混合程度以及水泵启动速度等条件的影响,流量变化过程复杂,本文主要研究虹吸管在虹吸形成过程中的气液两相流动结构以及水气混合对虹吸完成时间的影响,为简化计算,本文将虹吸形成过程中的水泵流量概化为稳态流量过程,通过研究稳态流量与虹吸形成时间的关系反映虹吸形成时间的内在特性。

设置定解条件为:虹吸管进口设为流量入口条件;出水池出水侧挡水墙上方为气液两相出口,设为压力出口条件;出水池水面以上大气进口设为压强出口条件;虹吸管及出水池边壁设为壁面边界;初始时刻虹吸管与出水池中的气液交界面设为 interface 类型。初始时刻,出水池由出水侧挡水墙拦蓄的部分为静止水体,出水池水位以上以及虹吸管上升段部分为空气,故初始条件设出水池和虹吸管出口段在出水水位以下的区域水体积分数为 1,其他区域水体积分数为 0,水体部分在重力方向按静压条件分布,速度场为 0。

## 2.5　数值算法

CFX 软件采用基于有限元的有限体积法对方程组进行离散,该方法在保证有限体积法守恒特性的基础上,吸收了有限元法的数值精确性。对流场

的求解使用全隐式多网格耦合求解方法,同时求解动量方程和连续性方程。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 虹吸管气液流动特性

虹吸式出水管的流动特性与型线设计、流道形状和尺寸参数的选择密切相关[14]。本文虹吸管上升段为圆形过流断面,在上升段末端逐渐过渡为矩形过流断面并与驼峰段相连,在下降段和出口段,矩形过流断面宽度保持不变,高度逐渐增大。水流在沿程流动过程中,有多次流动方向的剧变,同时水流还要作横向和纵向扩散,内部流态复杂。

通过试算与比较,最终确定数值计算时间步长为 0.05 s,迭代 1 500 步,初始时间为 0 s。在水力驱气阶段,随着虹吸管进口水量的不断增加,虹吸管上升段水面逐渐上升,管内气体在上升水流的驱动下从出水池排出,在 13.10 s 时刻,水流上升至驼峰顶部断面,翻过驼峰顶部后,水流开始快速向下滑落,在 14.50 s 时刻,翻越驼峰的水流与出水池水流开始交汇,形成水气混合流动,虹吸过程进入水力挟气阶段。在水力驱气阶段,虹吸管内水体与气体相对分离,上升段水流流速分布较为均匀,无脱流、漩涡等不良流态,管内气体受到上升水流挤压,空间减小,压强增大,迫使气体压低虹吸管出口段的水流并在虹吸管出口段上缘形成一个排气通道,排气通道位置如图 2a 所示,出水池水流受排出气体作用,稍有蠕动,流速较小。

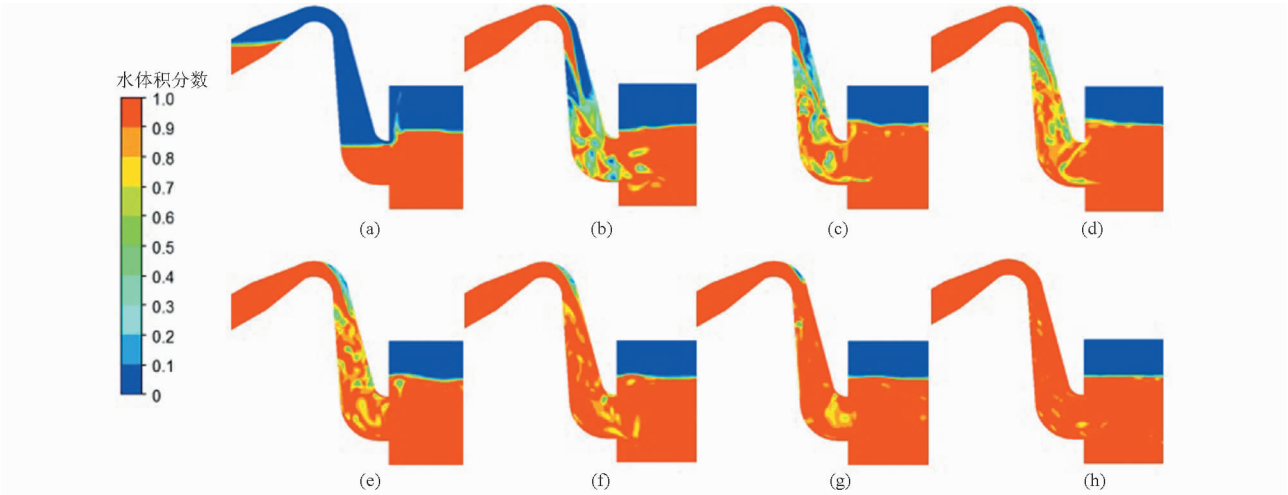


图 2 虹吸式出水管水力挟气过程

Fig. 2 Process of mixing gas-water carrying gas-water in siphon outlet

(a) $t$ = 12 s (b) $t$ = 16 s (c) $t$ = 20 s (d) $t$ = 24 s (e) $t$ = 28 s (f) $t$ = 32 s (g) $t$ = 36 s (h) $t$ = 40 s

图 2、图 3 分别为虹吸管水力挟气阶段的水气混合过程与水流的流速分布图,由计算结果可知,虹吸管水力挟气阶段历时较长,在 $t$ = 14.50 s 时,来流与出水池水流交汇,形成水气混合流动,在水气混合初期,翻越驼峰的水流贴虹吸管下壁向下跌落,形成堰流形态,由于下降角较大,水流在惯性的作用下,在下降段头部位置从虹吸管下壁脱落,从而在跌落水流与出水池水流交汇后,在虹吸管下降段形成上、下两个气囊,气囊位置如图 2b 所示,此时来流由于主流集中,流速较大,水气混合流体受到来流的冲击,在虹吸管出口段形成剧烈的翻滚,管内气体与水体混合后在水流的挟带下从出水池间歇性排出。随着管内气体的逐步带出,虹吸管出口段的混合流体液面逐渐上移,在大约 $t$ = 31 s 时,水气混合流体上

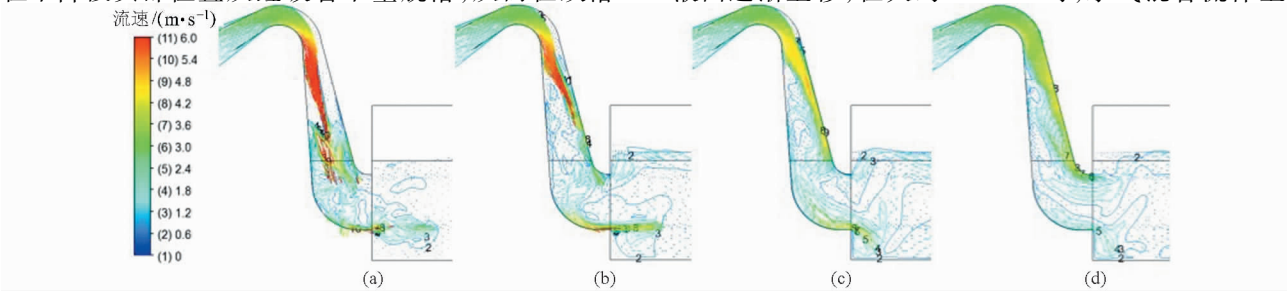


图 3 水力挟气阶段水流速度矢量图

Fig. 3 Profile of water-velocity on the process of mixing gas-water in siphon outlet

(a) $t$ = 16 s (b) $t$ = 24 s (c) $t$ = 32 s (d) $t$ = 40 s

升至虹吸管下壁水流脱落点，下气囊消失，上气囊空间缩小至驼峰段内，此时水气混合流体主流靠虹吸管上壁区域，在虹吸管下壁及出水池区域，流体表现为大范围的翻滚和滞水流态。在 $t=39$ s 时，虹吸管内气体被全部带出，形成虹吸管满管流动，虹吸作用完成。

虹吸过程中，管内上、下气囊对虹吸作用的完成有着极其重要的影响，为此，在模拟虹吸过程中，在虹吸管驼峰段与下降段的上壁和下壁分别布置 3 个测点和 2 个测点来监测上、下气囊的压力变化过程，测点布置见图 4。

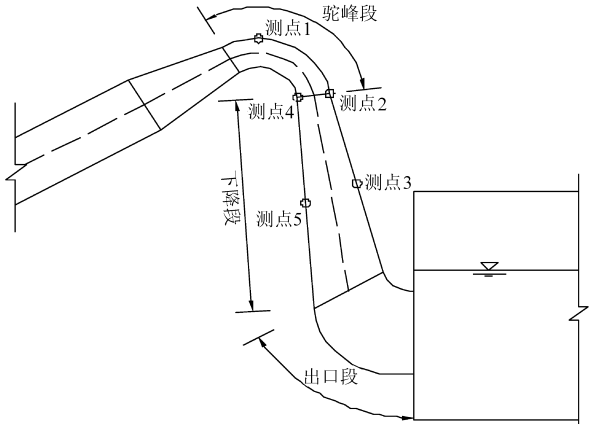


图 4　虹吸管压力监测点布置示意图

Fig. 4　Location for monitoring pressure in siphon pipe

图 5 为各测点在虹吸过程中的压力变化过程曲线，按照测点压力变化特点可将虹吸过程分为 3 个过程（如虚线分割所示），其中由左至右第 1 过程为水力驱气阶段，第 2 过程与第 3 过程为水力挟气阶段，在第 1 过程，各测点均处于气体当中，各测点压强大小及变化趋势基本相同，虹吸管进水后，管内气体压强从零快速升高至一稳定的正压并在其上下波动。第 2 过程，主要为下气囊排气阶段，在水力挟气初期，来流与出水池水流交汇，水气混合剧烈，管内各测点压强急速减小并进入负压状态，管内气体无法靠压差直接排出管外，排气通道消失，管内气体靠水流挟带排出，随着水气混合的逐渐稳定，各测点压强逐渐降低。第 3 过程，为上气囊排气阶段，此时，下降段各测点压强稳定，驼峰顶部测点压强随着上气囊气体的逐渐带出而继续降低，降低速度缓慢，在 $t=39$ s 时，虹吸管上气囊消失，虹吸管内气体被水体全部挟带排出，管内压力趋于稳定。

为验证虹吸式出水管虹吸过程数值模拟的正确性，对虹吸管的虹吸形成过程进行了物理模型试验，试验装置见图 6 所示，模型按重力相似准则设计，模型比尺为 1∶7。

将计算所得的驼峰顶部测点的压力变化过程与试验测试结果进行对比，见图 7 所示，图中可以看出计算结果与实测结果接近，两者吻合较好。

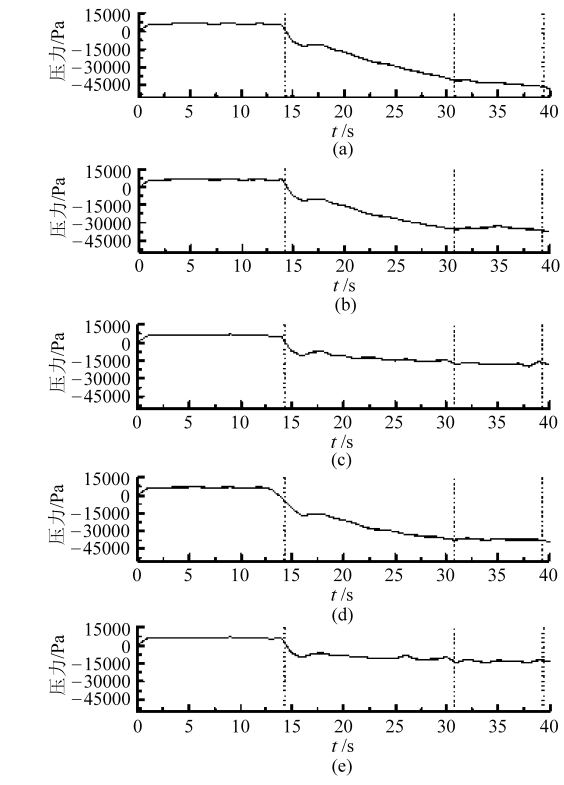


图 5　虹吸过程监测点压力变化曲线

Fig. 5　Pressure variation law of measuring points in siphoning

（a）测点 1　（b）测点 2　（c）测点 3　（d）测点 4　（e）测点 5



图 6　虹吸管模型试验装置

Fig. 6　Test device of siphon pipe

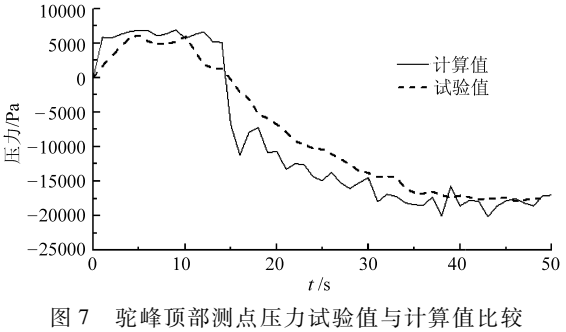


图 7　驼峰顶部测点压力试验值与计算值比较

Fig. 7　Contrast of pressure with test value and calculated value

### 3.2　虹吸形成时间特性

影响虹吸形成的因素较多，通常可以分为确定性影响因素和非确定性影响因素。确定性影响因素

主要有虹吸式出水管的类型、工艺布置方案以及水泵性能等,非确定性因素主要有机组启动方式(如机组启动过程中出水管驼峰段虹吸破坏阀是否排气,是否抽真空)和运行工况的变化[7]。本文研究在水泵启动过程中不抽真空,靠水流自然排气过程下的虹吸形成时间特性。

由前述分析可知,在水力挟气阶段,虹吸管内气液流动结构复杂,尤其管内上、下气囊的存在对虹吸作用有着较大的影响。当改变来流条件时,虹吸管内上、下气囊的形态和气液流动特性将会发生改变,并最终影响虹吸作用的完成。

图 8 为改变来流流量时,水气混合初期的虹吸管上、下气囊形态图。虹吸管的来流流量通常小于等于水泵设计流量,考虑到水泵实际运行过程中流量大于设计流量的可能,并为探讨不同流量对虹吸管的气液流动特性的影响,本文取流量范围在(0.6 ~ 1.4)$Q_d$之间。由图可知,当来流流量减小时,由于来流流速减小,虹吸管下壁脱落点下移,$Q = 0.6Q_d$时,来流在虹吸管下壁不再脱落,下气囊消失,上气囊区域明显增大,相反,当来流流量增大时,由于流速增大,水流在惯性作用下,上气囊空间被压缩,$Q = 1.4Q_d$时,来流贴虹吸管上壁流入出水池,此时,上气囊消失,下气囊区域明显增大。根据虹吸过程中管内压力变化的不同阶段列出各流量下虹吸管的虹吸形成时间见表 2。

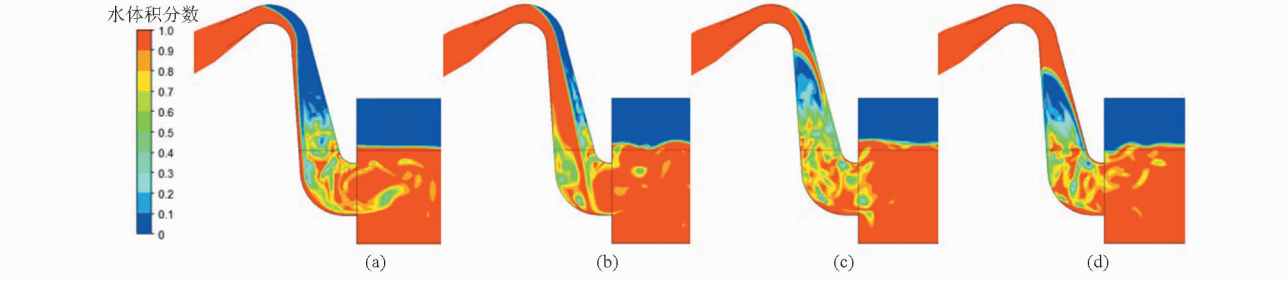


图 8 不同流量下水气混合初期虹吸管气囊形态图

Fig. 8 Shape features of air sacs in siphon pipe

(a) $Q = 0.6Q_d$ (b) $Q = 0.8Q_d$ (c) $Q = 1.2Q_d$ (d) $Q = 1.4Q_d$

**表 2 不同流量下的虹吸形成时间**

**Tab. 2 Siphoning time under different flow rates** s

| 流量 | $0.6Q_d$ | $0.8Q_d$ | $Q_d$ | $1.2Q_d$ | $1.4Q_d$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 第 1 过程 | 23.6 | 17.9 | 14.5 | 12.3 | 10.2 |
| 第 2 过程 | 0 | 0 | 16.5 | 17.7 | 14.8 |
| 第 3 过程 | 78.4 | 36.1 | 8.0 | 0 | 0 |
| 总历时 | 102 | 54 | 39 | 30 | 25 |

注:表中 0 值表示对应流量下虹吸管无上气囊或者下气囊。

绘制相对虹吸形成时间与相对流量之间的关系曲线见图 9 所示,其中,$T_1$、$T_2$为水力驱气和水力挟气用时,$T_{d1}$、$T_{d2}$为设计流量时水力驱气和水力挟气用时,$T_1/T_{d1}$、$T_2/T_{d2}$为水力驱气和水力挟气相对用时,$Q/Q_d$为相对流量,将两个阶段的时间与流量关系曲线用幂函数进行回归得到关系式:$T_1/T_{d1} = (Q/Q_d)^{-0.96}$,$T_2/T_{d2} = (Q/Q_d)^{-2.24}$。可见,虹吸式出水管虹吸形成过程中水力驱气阶段和水力挟气阶段均可通过幂函数来表达其时间与流量的关系。

将不同流量下水力挟气阶段用时的试验值通过相似定律换算并与计算值进行对比,如图 10 所示,可以看出,计算结果与试验结果相近,这也验证了本文数值模拟结果的可靠性。

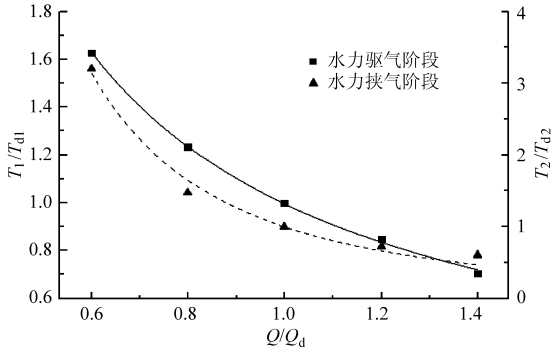


图 9 流量与虹吸形成时间关系曲线

Fig. 9 Curves of relation between the siphoning time and flow rate

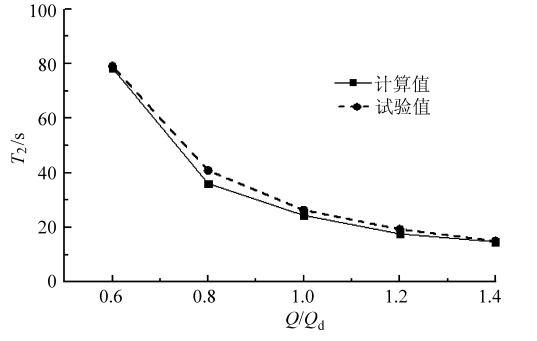


图 10 水力挟气阶段用时试验值与计算值比较

Fig. 10 Comparison of siphoning time between test value and calculated value in mixing water-gas process

## 4　结论

（1）虹吸管虹吸气液两相流动过程包括水力驱气和水力挟气两个阶段，其中水力挟气阶段气液流动相对复杂，水气混合过程中，在虹吸管下降段的上壁和下壁易产生上、下气囊，直接影响着虹吸作用的完成。

（2）根据虹吸管内的压力变化特点可以将虹吸过程分为 3 个过程，每个过程可以反映不同的气液流动状况，通常驼峰顶部的压力变化可以反映虹吸作用的全部过程。

（3）在改变外部运行条件下，影响虹吸形成时间的主要因素为流量，水力驱气阶段和水力挟气阶段可分别用不同的幂函数来表达时间与流量的关系。

## 参　考　文　献


1　冯建刚，成斌，王晓升. 基于 π 定理的虹吸式出水管原型和模型虹吸形成时间的相似分析[J]. 清华大学学报：自然科学版，2011，51(4)：503－507.
Feng Jiangang, Cheng Bin, Wang Xiaosheng. Similarity analysis of siphon formation time of siphon pipes between the prototype and model based on the π theorem [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2011, 51(4): 503－507. (in Chinese)

2　刘梅清，杨文容，徐叶琴. 带虹吸式出水流道轴流泵站起动水力过渡过程研究[J]. 武汉大学学报：工学版，2003，36(1)：1－4.
Liu Meiqing, Yang Wenrong, Xu Yeqin. Research on start-up hydraulic transient of axial-flow pumping stations with siphon outflow conduit [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(1): 1－4. (in Chinese)

3　Cognet G Mignot, Mark Blanchard, Francois Werkoff. PIV measurements and computations of the transient flow in a siphon[C]// Fifth International Conference on Laser Anemometry: Advances and Applications, Proc. SPIE, 1993, 2052: 509－516.

4　Babaeyan-Koopaei K, Valentine E M, Alan Ervine D. Case study on hydraulic performance of brent reservoir siphon spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(6): 562－567.

5　仲付维. 泵站虹吸式出水管驼峰真空值试验研究[J]. 河海科技进展，1994，14(2)：64－70.

6　于永海，徐辉，陈毓陵. 城市排污泵站虹吸式出水管水力瞬变过程现场试验分析[J]. 给水排水，2005，31(9)：86－88.

7　冯建刚. 大型城市取水泵站虹吸式出水管水力特性研究[J]. 给水排水，2007，33(11)：203－206.
Feng Jian'gang. Research on hydraulic characteristics of siphon-type water out flow pipe in big-size municipal water intake pumping station [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(11): 203－206. (in Chinese)

8　朱红耕，袁寿其，刘厚林，等. 大型泵站虹吸式出水流道三维紊流数值计算[J]. 扬州大学学报：自然科学版，2005，8(2)：74－78.
Zhu Honggeng, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Numerical computation of the three-dimensional turbulent flow in siphon outlet conduit of large pumping stations[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2005, 8(2): 74－78. (in Chinese)

9　朱红耕，袁寿其，施卫东. 大型泵站虹吸式出水流道水力特性分析[J]. 中国农村水利水电，2005(7)：71－76.
Zhu Honggeng, Yuan Shouqi, Shi Weidong. Study on the hydraulic characteristics of the siphon outlet conduit of large-sized pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(7): 71－76. (in Chinese)

10　杲东彦，陆林广. 基于 RNG 模型的虹吸式出水流道三维紊流数值模拟[J]. 南京工程学院学报：自然科学版，2008，6(2)：22－25.
Gao Dongyan, Lu Linguang. Three-dimensional numerical simulation of flow in the siphon outlet passages based upon RNG $k$-turbulent model[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2008, 6(2): 22－25. (in Chinese)

11　陆林广，祝婕，杲东彦. 大型泵站虹吸式出水流道优化水力设计[J]. 农业机械学报，2005，36(4)：60－63，68.
Lu Linguang, Zhu Jie, Gao Dongyan. Optimumhydraulic design of siphon outlet in large pumping stations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4): 60－63, 68. (in Chinese)

12　Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3－51.

13　Orszag S A, Yakhot V, Flannery W S, et al. Renormalization group modeling and turbulence simulations[C]// International Conference on Near-Wall Turbulent Flows, Tempe, Arizona, 1993.

14　冯建刚. 城市排水泵站虹吸式出水管水力特性研究[D]. 南京：河海大学，2010.
Feng Jian'gang. Research on hydraulic characteristics of siphon-type water outflow pipe in urban drainage pumping stations[D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese)


（下转第 29 页）

Science and Technology, 2012,18(3):281 – 287. (in Chinese)
17 戴咏川,戴承远.由折射率预测柴油的十六烷值[J].石油与天然气化工,2000,29(1):23 – 25.
Dai Yongchuan, Dai Chengyuan. Prediction for the cetane number of diesel fuels from refractive index[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2000, 29(1):23 – 25. (in Chinese)
18 何学良.内燃机燃料[M].北京:中国石化出版社,2004.

# Visualization Experiment of Internal Flow of Nozzle and Spray Construction for Various Fuels

Jiang Guangjun[1]　Zhang Yusheng[1]　Medhat Elkelawy[2]　Xiao Gan[1]
(1. *College of Energy and Power Engineering*, *Huazhong University of Science and Technology*, *Wuhan* 430074, *China*
2. *Faculty of Engineering*, *Tanta University*, *Tanta* 31111, *Egypt*)

**Abstract**: A visualization experimental apparatus with high speed controlled flash photography techniques was developed to investigate the flow in the hole of diesel injection nozzles and the spray construction near orifice. The experiments were performed with the transparent actual nozzles for diesel, gasoline, ethanol diesel fuel and biodiesel. The results indicate that the cavitation films could be observed in the hole for all fuels. The initial cavitation was appeared earlier and the cavitation intensity was stronger for the fuel which had lower viscosity and higher saturated vapor pressure. There was larger spray cone angle with stronger cavitation intensity. After the jet was finished, the gas backflow phenomenon could be observed in the hole and the initial bubble would be produced. And the initial bubble size could increase with the reduction of fuel surface tension. The flow status in the pressure chamber and hole was greatly affected by the movement of needle.

**Key words**: Injector nozzle　Flow　Cavitation　Spray construction　Visualization experiment

(上接第 83 页)

# Numerical Simulation for Two-phase Flow of Siphon Outlet in Pumping Station

Wang Xiaosheng[1,2]　Feng Jian'gang[2]　Chen Hongxun[1]　Bu Lifeng[2]　Tan Linlu[2]
(1. *Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200072, *China*
2. *College of Water Conservancy and Hydropower*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

**Abstract**: In order to understand the characteristic of the gas-liquid two-phase flow in siphon pipe, based on the homogeneous model in multiphase flow theory of ANSYS CFX software and RNG $k$-$\varepsilon$ turbulence model, the process of gas-liquid flow for a siphon outlet pipe in pumping station was simulated. Results of simulation showed that the air sacs are easily generated on the shell of siphon pipe when the gas mixed into the water and it has an extremely adverse influence with the siphon finish. Meanwhile, flow rate of the incoming flow is the main factor impacting the siphoning time. At last, the relations between the siphoning time and flow rate for hydraulic driving-gas and mixing gas-water processes, according with the power function relationship, were given.

**Key words**: Siphon pipe　Gas-liquid two-phase flow　Siphoning time　Numerical simulation