DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.06.26

虹吸管道水气两相流动过流能力的试验分析

张小莹1,李琳1,王梦婷2,谭义海1

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆新能源新风投资开发有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:通过对虹吸式输水管道输水能力的试验研究,观测到不同安装高度下的气液两相流现象。量测了不同安装高度相应水位差下的流量的大小,并分析了流量变化规律。研究发现,随着安装高度的增大,虹吸管内气液两相流流型由气泡流转化为气团流。分析原因发现在安装高度 h_s = 2 m 时,流量减小率与面积减小率相等,表明气液两相流时过流面积小于液相满流时过流面积是流量的减小的主要原因;当安装高度 h_s > 2 m 时,流量减小率与面积减小率有等,表明气液

关键词:虹吸管道; 气泡流; 气团流; 流量; 沿程阻力

中图分类号:TV672.5 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2015)06-0142-04

Analysis of flow capacity of gas – liquid two phase in siphon pipe

ZHANG Xiaoying¹, LI Lin¹, WANG Mengting², TAN Yihai¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
 2. Xinjiang New Energy Xinfeng Investment & Development Co. Ltd, Urumqi 830000, China)

Abstract: The article studied the conveyance capacity of siphon pipeline and observed the gas-liquid twophase flow phenomenon under different heights of installation. It measured the flow of water level difference under different installation height corresponding and analyzed the change rule. The study found that with the increase of installation height, the gas-liquid two phase flow in siphon tube transforms from bubble flow into air mass flow. Through analyzing the reason it is found that in installation height h_s equals to 2 m, the decrease rate of flow and area are equal, which shows that when the gas liquid two phase flow area is less than the liquid flow in full flow area is a major cause of the decrease of flow; when the installation height h_s is greater than 2 m, the difference of flow reduce rate and area decrease rate is larger, which indicated that the decrease of flow is not only related to the area change, but is also related to the frictional resistance coefficient along the path. The increase of gas concentration makes pipe pressure drop increase, the increase of pressure drop causes the pipe resistance to increase, thus result in the increase of on-way resistance coefficient and the decrease of flow.

Key words: siphon pipe; bubble flow; air mass flow; flow; frictional resistance on the way

随着地表水水资源的大量开发应用,坎儿井式 的地下水库的建设和研究已成为近些年新疆水利工 程界关注的重点。在坎儿井式地下水库中,长距离、 大真空度的虹吸式输水管道是其重要组成部分。目 前,国内外学者多以短距离虹吸管道(如驼峰式虹 吸管道)为研究对象,对虹吸的过程以及虹吸管道 水力特性进行了多方面研究^[1-3],但对长距离虹吸 管道的研究较少。李琳等^[4]、许史^[5-6]等在新疆台 兰河某地下水库中长距离虹吸管道水力学模型试验 时发现,即使在安装高度小于7m时,虹吸管内依然

收稿日期:2015-05-05; 修回日期:2015-06-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51369031);新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2015018);新疆水利水电 工程重点学科基金项目(XJZDXK-2002-10-05)

作者简介:张小莹(1992-),女,新疆伊宁人,硕士研究生,从事计算水力学研究。

通讯作者:李琳(1979-),女,山东青岛人,博士,副教授,从事水力学及河流动力学研究。

是气液两相流,而不是单相液流运动,且随着管道的 安装高度增大,含气量不断增大,管道实际过流量愈 小于有压管流流量公式计算值^[7];王梦婷等^[8]针对 非驼峰式的正虹吸管道进行了系列试验研究,并将 量纲分析法与数值拟合方法相结合,获得了大真空 正虹吸管道输水流量的计算公式。笔者针对不同安 装高度、不同水头差的虹吸管进行了系列实验,观测 不同安装高度下的气液两相流现象;量测不同安装 高度的流量大小,并对实际输水流量小于理论输水 流量的原因进行了探讨和分析。

1 试验装置及测量方法

试验装置如图1所示,试验由上游进口溢流堰、

虹吸管路、下游出口堰组成。其中虹吸管路是由有 机玻璃制作而成,管径为2 cm,管长为17.7 m。掺 气电极和电子真空压力表,分别用以测量管道内掺 气浓度和压强。试验用测针量测上下游水位差;虹 吸管道流量用 20°开口三角形薄壁堰量测;掺气浓 度及压降值用环形掺气电极与 DJ800 数据采集系统 进行量测,量测结果通过笔记本电脑输出;实测过流 断面面积(用A_s表示)的测量方法是:在水平管道安 装一个可移动的测针,当气泡流经时分别读出气泡 与水的上下交界面的高度,二者的差值即为气泡的 直径(将气泡当做球体),待计算出管内气泡的面积 和之后,用过水断面理论值减去气泡面积后的值即 为A_s。



图1 试验装置图

为研究安装高度及上下游水位差对真空有压管 道的输水能力的影响,选取8组不同安装高度h,和 7组不同上下游水位差 H进行输水试验,h,由小到 大为1、2、3、4、5、6、7、8m;H由小到大依次为7,17, 27,37,47,58,68 cm。首先将上、下游堰顶差调制所 需要的水位差,之后将水泵1打开向上游溢流堰供 水,待水面漫过堰顶时,将水泵2与上行管管口相连 接进行充水,待管中完全被水流充满时,移走水泵 2,使管道形成自然虹吸,接着用环形掺气电极与 DJ800数据采集系统进行量测掺气量及压降,最后 进行流量的量测。对不同安装高度及不同水位差下 的流量实测值与理论值进行对比,观察实测值与计 算值的变化规律并找出原因,最终确定何为影响虹 吸管路输水流量的因素。

2 试验结果及分析

2.1 虹吸管内气液两相流流型

不同安装高度、不同水位差时管道内的气泡大小、密集程度、运动规律均不相同。图2为H一定,

不同h.下虹吸管内的气液两相流态。图3为h.一定, 不同H时虹吸管内气液两相流流态。从图2(a)可以 看出,当h,=1m时,虹吸管道内为单一液相流,管 路完全被水充满,并未观察到有气泡析出;当h,为2 和3m时,管内有少量小气泡析出,并且气泡以较快 速度随水流运动,称此流动现象为气泡流(见图2 (b));当h,为5m时,可以看到有一部分气泡顺着 水流方向运动,另一部分由气泡相连形成的气囊附 在管壁上随水流缓慢移动,称气囊以缓慢流速随水 流运动的水气两相流动为气团流。(如图2(c)); 当 H_{e} = 7 m 时, 比 h_{e} 为 6 m 的气泡增大了 1 倍左 右。不难发现,随着 h, 的增大,水平管段内气团流 所占的比重逐渐增大;当安装高度达到8m时(如 图 2(d) 所示), 气囊随水流缓慢运动并逐渐趋于静 止,当体积增大到贯穿整个管段时,管路发生断流现 象。从图 3 可以看出, 当 h_{e} = 2 m 时, 随着 H 的增 大,管道内水流流速增大,气泡析出的速度小于水流 流速,来不及析出就已经被输送至下游,管内流态由 气泡流转变为单一液相流。





(a) H=37cm工况下实验现象

图 3 安装高度为 2 m 时试验现象

2.2 虹吸管内气体存在对过流能力的影响

在h,不变的情况下,随着H的增大,虹吸管道 的过流量 0 逐渐增大,这一规律与有压管流流量与 水头呈正比变化一致;在H一定的情况下,随着 $h_{\rm e}$ 的增大,受气体存在的影响,虹吸管道的过流量逐渐 减小,而水力学中虹吸管流量计算按照有压管流流 量公式计算时,流量大小与管道的安装高度无关。为 了说明h。对流量的影响程度引出流量减小率的概 念,即将不同水头差虹吸管内为单一液相满流时 $(如 h_s = 1 m 时)$ 的流量值作为理论值,将理论值 Q_L 和实测值Q、间的相对差值与理论值Q,之比作为流 量减小率 ΔQ ,如式(1)所示。将上下游水位差、安装 高度与流量减小率的关系绘制于图4中。

$$\Delta Q = \frac{Q_L - Q_s}{Q_L} \times 100\% \tag{1}$$



图 4 不同安装高度 h_{a} 与流量减小率 ΔO 关系曲线图

从图 4 可以看出,在 H 一定的情况下, ΔQ 随着 h_{c} 的增加而增大;当H = 47 cm时, h_{c} 从2 m增大到 8 m,流量减小率 ΔQ 从 3.5% 增加到 22%。综上所 述,虹吸管道内输水流量的理论值与实测值存在一 定的偏差,由常规有压管流流量计算公式 Q =

____A √2gH 可知,在管道长度 L、管道布 $\sqrt{\lambda l/d} + \sum \zeta$

置形式及水位差*H*一定时,影响虹吸管道的输水流 量的因素主要有沿程阻力系数 λ 和讨流面积A.笔 者针对掺气时面积和沿程阻力的变化对流量的影响 进行了讨论。

流量的影响因素分析 3

3.1 过流面积对流量的影响

3.1.1 气泡流时管道过流能力影响因素 h_=2 m时,管内呈现气泡流。计算了 h。=2 m时不同水 位差时流量减小率和面积减小率绘于图5中。从图 5 可以看出,随着面积减小率的增大,流量减小率逐 渐增大,且面积减小率与流量减小率接近, $\Delta Q = \Delta A$ 呈斜率约为1的线性关系。由此可知管道内气液两 相流流型为气泡流时,过水断面面积的减小率约等 于流量减小率,表明过水断面积的减小是管道流量 减小的主要因素,而气泡流情况下气体存在对沿程 阻力系数 λ 影响很小,此时 λ 值可近似按照液相流 时沿程阻力系数的确定方法来确定。



图 5 $h_s = 2 \text{ m}$ 时不同水位差下 $\Delta A = \Delta Q$ 的关系图

3.1.2 气团流时管道过流能力影响因素 当安装 高度从3~5m的过程中,虹吸管内流型为气泡流掺 杂气团流。当安装高度为6~8m时,管道内气液两 相流流型为气团流。以安装高度为5、7 m时不同上 下游水位差下面积减小率 ΔA 与流量减小率 ΔQ 进 行比较,由图6可以看出,面积减小率与流量减小 率呈曲线的关系,随着水位差的增大,流量减小率减 小,面积减小率也逐渐减小,但相同水位差时流量的 减小率约为面积减小率2倍,可见过水断面积减小 并不是导致流量减小率的唯一因素,还应考虑流量 系数或沿程阻力系数对流量的影响。随着安装高度 增大,相同水位差时管道流量减小,由有压管流流量 公式可知,除过水断面积减小会影响管道过流量外, 沿程阻力系数增大,使过流量减小。当管道内形成 气团流时,沿程阻力系数受气团体积大小和掺气浓 度的影响,使得沿程阻力系数不同于单一液相流时 沿程阻力系数值。说明当管内呈现气泡流掺杂气团 流或气闭流时, 讨流面积的减小并不是导致流量减 小的唯一因素,除面积外还应考虑气体存在对沿程 阻力系数的影响。



3.2 沿程阻力变化对流量的影响

有压管流的沿程阻力系数 λ 是根据尼古拉兹 实验结果进行计算的,虹吸管道输水时,管道内流态 由单一的液相流转化为气液两相流,随着安装高度 的增大,分散在管中的气泡体积逐渐变大,还有部分 气泡形成气囊,此时沿程阻力由3部分组成,一部分 是液体与管道壁面间的摩擦阻力,一部分是气体与 液体间的相对运动产生的摩擦阻力,还有一部分是 气体与管壁间的摩擦阻力。沿程阻力系数λ显然 不能按照满流时的经验公式进行计算。由式(2)可

$$\Re_1: Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w$$
(2)

式中: Z_1 、 Z_2 表示位置水头; $p_1/\rho g$ 、 $p_2/\rho g$ 表示压强 水头,其中 p_1 、 p_2 表示压强, ρ 表示液体密度,g表示 重力加速度, $v_1^2/2g$ 、 $v_2^2/2g$ 表示速度水头,其中 v_1 、 v_2 表示水流流速; h_w 表示水头损失,本试验中水平管 段为均匀、平直管道,所以局部水头损失可忽略不 计,由于水平管段 $Z_1 = Z_2$, $v_1 = v_2$,可得式(3),即沿 程阻力与压降有关。图7是不同掺气浓度与虹吸管 水平管道的压降变化规律图。





图 7 掺气浓度与压降的变化规律图

从图 7 中可以看出掺气浓度与压降的总体变化 趋势是:随着掺气浓度的增大,管道压降也逐渐增 大。而根据式(3)可知,压降增大,气液两相流动阻 力增大,其沿程阻力系数必然大于单相液流时的沿 程阻力系数。在其他变量不变的情况下,沿程阻力 系数 λ 增大,管道的过流能力减小,从而导致管道 输水能力降低。

4 结 语

通过对8组安装高度和7组上下游水位差对虹 吸管道进行了系列的试验研究,试验中观察了不同 工况下的水流流态,分析了不同安装高度及水位差 下流量的变化规律,并得到以下结论:

(1)随着安装高度的增加,真空有压管内由单一的液相流变为气液两相流,气液两相流包括气泡流和气团流。随着安装高度的变化,虹吸管内的气液两相流流型由气泡流→气泡流为主(掺杂气团流)→气团流为主(气泡流很少)→断流。

(2)真空有压管道的过流量随安装高度的增大 (下转第150页)



图 10 20 年一遇设计降雨积水深分布图

由图 10 分析可知暴雨内涝的积水面积为 516.23 km²。港河和黑河积水较深,最大积水深可 达5~6 m;架河、泥河和鳗鲤池次之,最大积水深为 4~5 m。积水深为1~2 m 的村庄有古堆寺、前寺 西、吴家园、前陈家、新庄、老南郢子、陶圩子、张巷子 等村庄,积水深为2~3 m 的村庄有架河集、谷家岗、 谭庄、芦家沟、秦庄等村庄。

3 结 语

本文基于 GIS 技术和 SWMM 建立了茨南淝左 片防洪保护区暴雨内涝风险分析模型,基于 DEM 建 立了容积 - 水位关系,在模型参数率定的基础上,模 拟了研究区遭遇 20 年一遇暴雨的内涝积水风险,计 算结果较为合理。由此可见,GIS 技术的空间数据 综合与空间分析能力融合 SWMM 模型专业的水文 分析能力,可以解决防洪保护区雨情数据处理、水文 建模,内涝结果分析等方面的问题。同时,也提高了 模型构建效率及模型精度,使得展示效果更加形象、 逼真。因此,GIS 技术与 SWMM 模型的融合应用, 为暴雨内涝积水风险研究提供了新的思路和解决方 案。

参考文献:

- [1] Barco J, Wong K M, Stenstrom M K. Automatic Calibration of the U. S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(4):466-474.
- [2] Bates P D, De Roo A P J. A simple raster based model for flood inundation simulation [J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1): 54 - 57.
- [3] 孟 超,杨 昆. SWMM 模型与 GIS 集成技术研究[J]. 安 徽农业科学, 2012, 40(10): 6286-6287, 6298.
- [4] 李彦伟,尤学一,季 民,等. 基于 SWMM 模型的雨水管网 优化[J]. 中国给水排水,2010,26(23):40-43.
- [5]张杰.基于 GIS 及 SWMM 的郑州市暴雨内涝研究[D]. 郑州:郑州大学, 2012.
- [6] 石赟赟,万东辉,陈黎,等.基于GIS和SWMM的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J].水电能源科学,2014,32
 (6):57-60+12.
- [7] 黄国如,张灵敏,雒 翠,等. SWMM 模型在深圳市民治河 流域的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 10-14.
- [8] 黄 晶. 基于 GIS 的广州市新河浦社区城市雨洪模型研 究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [9] 李晓燕. SWMM 模型在西北典型城镇雨洪系统规划中 的应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.

(上接第145页)

而减小,随上下游水位差的增大而增大。在安装高度 h_s = 2 m 时,面积的减小是流量减小的主要原因, 当安装高度 h_s > 2 m 时,流量的减小不仅与面积的 减小有关,还与沿程阻力系数有关。

(3)在气泡流掺杂气团流或气团流中,气体的 存在不仅减小了过流断面面积,也使沿程阻力系数 增大;虹吸管中压降的大小随掺气浓度的增大而增 大,压降值的增大导致阻力增大,从而使沿程阻力系 数变大。

参考文献:

[1]朱红耕,袁寿其,施卫东,等.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):71-73+76.

- [2]朱红耕.大型泵站虹吸式出水流道水力特性分析[J].中 国给水排水,2006,22(6):54-57.
- [3] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 北京:中国水利水电出 版社,2007.
- [4] 李琳,邱秀云,许史,等.长距离虹吸管道输水水力学模型试验研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(3):106-109.
- [5] 许 史,李 琳,邱秀云,等. 长距离虹吸管输水试验研究初 探[J]. 中国农村水利水电,2010(3):70-72.
- [6] 许史. 长距离虹吸管输水试验研究[D]. 乌鲁木齐:新 疆农业大学,2010.
- [7] 邱秀云.水力学[M].乌鲁木齐:新疆电子出版社,2008: 188-222.
- [8] 王梦婷,李琳,谭义海,等.正虹吸管道水力特性实验研 究[J].水电能源科学,2014,32(12):87-90+98.