

# 供水工程空气阀的设置分析

胡建永<sup>1</sup>, 方 杰<sup>2</sup>

(1. 浙江水利水电学院 水利工程系, 浙江 杭州 310018; 2. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**管道供水工程的运行效果与空气阀的设置位置、间距和空气阀的进排气孔口尺寸关系密切。通过对管线中气体动态特性和管线输送气体能力的分析,提出了空气阀设置间距的建议取值原则。以管道充放水为控制工况,按照等体积原则推导了空气阀进排气孔口尺寸的理论计算方法。实例分析表明,经验取值与理论分析得到的空气阀设置方案存在明显的差异,理论分析得到的空气阀布置间距和进排气孔口直径比经验法更小。研究表明,以经验取值原则为基础,结合理论分析方法,可以为空气阀的设置和优化提供更为明确的分析依据。

**关键词:**空气阀; 口径; 充水; 放空; 供水工程

**中图分类号:** TV672+.2      **文献标志码:** A

大型供水工程是解决水资源时空分布不均,缓解水量供需矛盾的重要途径,管道密闭输水是其中重要的一种方式。采用这种方式不仅沿程水资源损耗小,而且在保护供水水质、节省投资和缩短工期等方面也具有优势,但同时也为供水工程安全运行带来了不利因素,尤其值得重视的是管道的进排气问题。尽管工程设计时对空气阀设置进行了充分论证,但由于进排气不畅而导致的运行事故仍时有发生。

空气阀是供水工程中的常见设备,主要起负压防护和运行排气的作用。空气阀的设置主要应考虑设置位置、间距以及口径等问题。理论研究和工程实践表明<sup>[1-4]</sup>,空气阀应设置在管线的隆起点以及长直管道上。对于空气阀的布置间距和口径的确定,目前尚缺乏系统的理论依据,在工程设计和实际运行中大多根据工程经验进行。由于缺乏理论指导,对空气阀设置的效果和合理性进行系统的评估也较为困难,尤其对于长距离供水工程,因管线长、起伏大,需要设置的空气阀数量众多,若设置不当,轻则产生设备浪费,重则造成管线进排气能力不足,危及工程的运行安全。因此,通过理论分析来对供水工程中空气阀的设置进行

评估是很有必要的。

## 1 管线中气体的动态特性

长距离供水管道系统中的气体来源主要是水流自身的溶解气体和某些非正常运行工况下由外部进入的气体。供水管道系统受水量需求的波动,运行工况多变,管道内水流流态复杂,在管道充水和放空工况下尤为突出。研究表明<sup>[5]</sup>,竖直管线中的水流流态大致有6种:泡状流、团状流、段塞流、泡沫流、环状流和雾状流。水平管线中的水流流态大致有7种,主要包括气泡流、团状流、层状流、波状流、段塞流、环状流及雾状流。在不同的流速和流态下,水体中气体的存在形式也不同,主要呈现为自由气泡、小气囊和滞留大气团。

空气阀在设计和计算时,引入的很重要的假设就是气体始终聚集在空气阀附近,但供水管道中水流的复杂流态,致使在很多运行工况下这一假设并不能很好地得到满足。国内外的理论研究和工程实践表明,空气阀的性能在很大程度上受到水流流态的影响。以排气功能为例,在很多工况下高速排气阀往往只能进行微量排气,难以做到在任何水流流态下都可靠地工

收稿日期:2013-08-10

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20100481081);江苏省博士后科研资助计划项目(1101020C);国家自然科学基金项目(51079050)

作者简介:胡建永,男,博士后,主要从事长距离输水工程的供水安全及系统优化研究。E-mail:jianyonghu@foxmail.com

作。对于供水管道系统而言,其设计工况下的满管流速一般都在  $1.0 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 。但供水工程的初期用水规模一般较设计工况低很多,管内的流速也相应较低,如果管线起伏程度太大或水流流速较小(低于  $0.6 \text{ m/s}$ ),管道中的自由气体将汇集成气囊,并有可能形成大气团滞留在管壁附近。滞留气团不仅导致管道输送能力下降,运行能耗增加,更为严重的是气团溃灭时将在管线中产生很高的压力,成为管道爆管、结构破坏等事故的诱因,严重威胁供水工程的安全运行。

## 2 空气阀设置间距的理论分析

通常认为长直管道上空气阀的设置间距宜为  $500 \sim 1000 \text{ m}$ 。空气阀的布置间距受管道输运气体能力的影响,而输送能力又受到水流流速、流态和管线布置的制约。

管道中的气囊受力比较复杂,能否保持稳定主要取决于重力  $G$ 、浮力  $F_L$ 、水流拖曳力  $F_D$  和表面张力  $F_T$  (见图1)。不同的管道布置情况下,气囊的受力情况也不同。

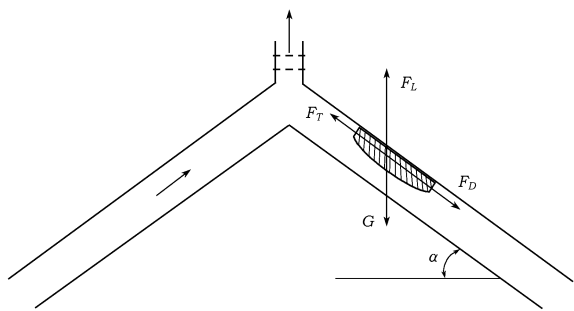


图1 管道中气囊受力分析示意

长而上升管道中的气囊,受水流拖曳力和浮力的作用可沿水流方向运动,水流输送气体的条件较好,气囊将较难保持稳定,会随水流到达管道的高点而排出。仅有一些微小的气泡因受管道不均匀的粗糙度影响,而滞留在管壁附近。因此,长而上升管道上空气阀的设置间距可以选择取值范围内的较大值。

长而水平管道中气囊的状态主要取决于水流的拖曳力。长而下降管道中的气囊,受水流的拖曳力和浮力作用,水流输送气体的条件相对较差。大量的理论和试验研究表明,长而水平管道和下降管道中水流输送气体的能力与水流流速、管道直径和管道倾斜角度有关,只有当管道水流流速达到某一临界值  $V_c$  时,管道中的气体才能被水流顺利带至下游并通过空气阀排出。

长而水平管道和下降管道上空气阀的设置间距取决于管道水流流速  $V$  与临界流速  $V_c$  的大小。临界流速  $V_c$  是表面张力、佛汝德数、雷诺数和管道倾角的函数,

受气囊体积的大小影响较小。对给定的管道,如果忽略表面张力的影响,则  $V_c$  与  $(gD)^{1/2}$  成比例。临界流速  $V_c$  从微观角度反映了管道水流输送气体的能力,可作为空气阀设置间距取值的参考依据<sup>[5]</sup>。

$$\frac{V_c}{\sqrt{gD}} = 0.55 + 0.5 \sqrt{\sin\alpha} \quad (1)$$

式中,  $D$  为管道内径,  $m$ ;  $g$  为当地重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\alpha$  为管道倾角,  $(^\circ)$ 。

综合以上分析,可以得到供水工程中空气阀设置间距的取值建议(见表1)。

表1 长供水管道中空气阀设置间距取值建议

管道分类	经验取值/m	本文建议
长上升管道	500 ~ 1000	取大值
长水平管道和下降管道	500 ~ 1000	当 $V > V_c$ , 取大值; 当 $V < V_c$ , 取小值

## 3 空气阀口径的理论分析

空气阀的功能主要是:①在管道充水时大量排气,防止水流冲击气团产生正压破坏;②在管道正常运行时微量排气,防止在管道中气泡聚集滞留;③在管道放空或爆管时快速大量进气,防止造成负压破坏。为了实现上述的功能,通常需要在供水管道上安装大口径进排气阀和小口径微量排气阀。供水工程正常运行时,大口径进排气阀处于关闭状态,主要依靠小口径微量排气阀排出水流中的少量气体。目前空气阀口径的确定尚缺乏系统的理论依据,一般认为具有进排气功能的空气阀口径宜为主管道直径的  $1/8 \sim 1/5$ ,仅有排气功能的空气阀口径宜为主管道直径的  $1/12 \sim 1/8$ 。

与正常运行工况相比,管道充水、放水时需要大量的进排气,对空气阀的进排气性能要求更高。研究表明,可将管道充水和放水分别作为分析大口径空气阀排气和进气孔口尺寸的控制工况。

### 3.1 管道充水排气对口径的要求

管道的充水流量一般设定为管道设计流量的  $5\% \sim 15\%$ ,充水流速一般控制在  $0.3 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 。空气阀孔口的气体流速一般应控制在  $30 \text{ m/s}$  左右,否则由于气流速度过大,有可能在阀门正常进排气时突然关闭,并产生很大的噪声<sup>[2,6]</sup>。实际的充水流量主要由管道和阀门的承压能力决定,基于水锤考虑的管道充水流量可按下式计算

$$Q_F = \frac{gA_p \Delta H_p}{a} \quad (2)$$

式中,  $Q_F$  为管道充水流量,  $m^3/s$ ;  $A_p$  为管道的截面积,  $m^2$ ;  $a$  为水锤波速,  $m/s$ ;  $\Delta H_p$  为管道允许的水锤升压

值, m。

不考虑空气的可压缩性, 可以近似认为充水流量与排气流量相等

$$Q_{out} = V_{out}A_{out} = Q_F \quad (3)$$

式中,  $Q_{out}$  为排气流量,  $m^3/s$ ;  $A_{out}$  为排气孔口面积,  $m^2$ ;  $V_{out}$  为允许排气流速, 无相关数据时可按 30 m/s 考虑。

从而得到大口径空气阀排气孔口尺寸的计算公式

$$D_{out} = D_p \sqrt{\frac{g\Delta H}{aV_{out}}} \quad (4)$$

式中,  $D_{out}$  为排气孔口直径, m;  $D_p$  为管道直径, m。

### 3.2 管道放空进气对口径的要求

管道的放空流速一般控制在 0.3 ~ 0.6 m/s, 泄水阀的直径应结合管道放空时间的要求确定, 一般取供水管道直径的 1/3。放空流量可按式计算<sup>[7]</sup>

$$Q_D = A_g \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\zeta}} \quad (5)$$

式中,  $Q_D$  为放空流量,  $m^3/s$ ;  $A_g$  为泄水阀过流面积,  $m^2$ ;  $\zeta$  为泄水阀全开时的阻力系数, 无相关数据时蝶阀取 0.14, 调流阀取 1.2;  $\Delta h$  为阀门两侧压力差, m。

不考虑空气的可压缩性, 可以近似认为放空流量与进气流量相等。

$$Q_{in} = V_{in}A_{in} = Q_D \quad (6)$$

式中,  $Q_{in}$  为进气流量,  $m^3/s$ ;  $A_{in}$  为进气孔口面积,  $m^2$ ;  $V_{in}$  为允许进气流速, 无相关数据时可按 30 m/s 考虑。

从而得到大口径空气阀进气孔口尺寸的计算公式

$$D_{in} = D_g \left( \frac{2g\Delta h}{V_{in}^2 \zeta} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

式中,  $D_{in}$  为进气孔口直径, m,  $D_g$  为泄水阀直径, m。

对于大流量供水工程, 按上述分析方法, 计算分析得到的空气阀口径可能较大, 在设备制造和安装等方面存在困难, 可以按照等面积原理在该位置以若干个直径较小的空气阀代替单个大直径空气阀。

## 4 算例分析

以某大型多支线输水工程的供水支线为例, 该支线长约 8.0 km, 隧洞段长约 1.5 km, 玻璃钢管段长约 6.5 km, 水锤波速  $a = 500$  m/s, 最高工作压力 50.8 m, 允许的最大水锤压力按 1.25 倍最高工作压力控制。管线设计流量 90 万  $m^3/d$ , 采用玻璃钢管, 管径为 3.0 m, 流速为 1.47 m/s, 管段总体平缓, 坡度约为 0.2‰。初步设计阶段管线中部和尾部各设置泄水阀 1 处, 泄水阀直径 1 000 mm; 设置 7 组空气阀, 间距均为 1 000 m, 第一组设置在隧洞出口附近, 均为组合式空气阀, 空气阀口径均为 200 mm, 每组 4 个阀门。

首先对空气阀间距进行评估。该工程管线布置平

缓, 坡度近似为  $\alpha = 0.2‰$ , 根据公式(1), 临界流速  $V_c = 2.98$  m/s。而该工程的管道供水流速为 1.47 m/s, 仅约为临界流速的一半, 水流输送气体的能力不足。从理论分析的结果看, 初步设计时设置间距的选取偏大, 建议在现有空气阀设置基础上, 于相邻空气阀中间位置再增设 1 组空气阀。

再对空气阀的口径进行评估。该工程采用的组合式空气阀兼具低压进排气阀和高压微量排气阀的作用。根据公式(4)及公式(7), 可得管道充水要求的排气口径  $D_{out} = 212$  mm, 管道放水要求的进气口径为  $D_{in} = 339$  mm。从理论分析的结果看, 初步设计时每组设置 4 个直径 200 mm (当量直径 600 mm) 的空气阀可以满足充放水工况对进排气的要求, 且有较大余量。在目前设计基础上建议每组设置 3 个直径 200 mm (当量直径 346 mm) 的空气阀即可满足要求。

## 5 结语

大型供水工程中, 空气阀一般作为水锤防护的辅助措施, 现有的经验取值范围是空气阀设置的基础。临界流速反映了管线输水气体的能力, 可以作为在经验取值范围内判断空气阀设置间距取值的参考依据。充放水工况是空气阀口径确定的控制工况, 相关的计算方法可以作为空气阀口径取值判断和优化的一种途径。在临界流速的理论分析和试验验证、不同型式空气阀孔口允许的气流速度、微量排气阀口径的确定等方面, 还有很多需要探讨的问题。对于现有的理论, 需要在工程应用中不断加以完善, 并进一步开展深入细致的研究。

### 参考文献:

- [1] 中国市政工程东北设计研究院. 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程(CECS 193:2005)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [2] Henry T. Falvey. Air - water Flow in Hydraulic Structures[M]. Denver: U. S. Government Printing Office, 1980.
- [3] 上海市交通和建设委员会. 室外给水设计规范(GB 50013 - 2006)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [4] 胡建永, 方杰, 张健, 等. 空气阀在长距离输水系统中的水锤防止作用[J]. 人民长江, 2008, 39(1): 63 - 65.
- [5] C S Lauchlan, M Escarameia, R W P May. Air in Pipelines[M]. London: HR Wallingford, 2005.
- [6] 房彦梅, 郭鑫鑫, 杨开林. 南水北调西四环暗涵安全输水关键问题[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 137 - 140.
- [7] 胡建永. 长距离输水工程的水锤防护与运行调度研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

(编辑: 徐诗银)

(下转第 31 页)

房前的电缆护套采用柔性电缆护套,约 1~2 m 长,通过已有照明电源的电缆孔进入启闭机房,最终连接到厂家定制的安装在 3 号启闭机房的 2 台 IHF-30A/80V 恒电位仪上。

### 3.4 数据传输

自动采集的闸门防腐数据通过一条光纤通讯电路自动传输到控制中心,能完成数据的传输、显示、形成报表,并且能在上位机上对恒电位仪进行设置。

### 3.5 外加电流阴极保护系统的调试和测量

(1) 在阴极保护系统通电前,检查系统的可靠性和线路连接状况,在无短、断路情况下采取小电位逐步极化,通电调试。

(2) 在确认系统接线正确后,将钢闸门控制点的保护电位调至保护要求,测量整个闸门外侧各部位的保护电位。

(3) 在通电一个星期后,整个钢闸门 95% 测点的

保护电位应达到设计要求。

(4) 保护电位的测量,使用高阻抗电压表和便携式参比电极。

## 4 结语

三汉河河口闸外加电流阴极保护系统自投入运行以来(大闸门开启期间关闭),系统运行正常,基本达到了设计要求。

(1) 为使闸门达到良好的防腐效果,在实施阴极保护系统前,需去除闸门外表面破损失效的涂层,整体修复闸门原防腐涂层。

(2) 此次实施的外加电流阴极保护主要是提升闸门防腐性能,经过 2 a 多的运行,其功能作用明显,达到了预期运用效果,可为其他类似工程管理提供参考。

(编辑:徐诗银)

## Application of cathodic protection in steel gate of Sanchahe Estuary Sluice

WO Yubao, ZANG Yingping, XU Xingwu

(Nanjing Sanchahe Estuary Sluice Management Office, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** In the original anti-corrosion design of the steel gate of Sanchahe Estuary Sluice in Nanjing City, the measure of zinc painted + chlorinated rubber coating outside surface of the gate and chlorinated rubber coating inside surface of the gate was adopted. Due to the low level of anti-corrosion and coating damage, the gate rusted seriously. According to the current situation and the characteristics of cathodic protection, the comprehensive measures are carried out both by outer cathodic protection with impressed current and inner anodic sacrifice protection after repairing the local damaged coating to enhance the anti-corrosion of gate and prolong its service life. The paper introduces the application of impressed current and anodic sacrifice protection in the gate, and focuses on the design, construction and application of impressed current mode that is less used in China at present.

**Key words:** cathodic protection; anti-corrosion technology; steel gate; Sanchahe Estuary Sluice; Nanjing

(上接第 11 页)

## Analysis on layout of air valves in water supply projects

HU Jianyong<sup>1</sup>, FANG Jie<sup>2</sup>

(1. Department of Hydraulic Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China;

2. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The operating effect of a water supply project is closely related with the layout position, interval, as well as orifice diameters of air inlets and outlets of air valves. The paper proposes the determination principle of interval value based on analysis of air dynamic characteristics and capability of air conveying in pipelines. Theoretical calculation method for orifice diameters of air valves is deduced according to the same volume principle under the case of water filling and emptying in pipelines. The result indicates that the layout solution of air valves has an obvious difference between experiential value and theoretical analysis. The interval and orifice diameters by theoretical analysis are quite smaller than those by experiences. Furthermore, the more specific reference for layout and optimization of air valves can be obtained based on experiential value and theoretical analysis simultaneously.

**Key words:** air valve; orifice diameter; water filling; water emptying; water supply project