

# 空气阀口径对有压管道停泵水锤的防护研究

徐放<sup>1</sup>, 李志鹏<sup>1</sup>, 王荣辉<sup>2</sup>, 廖志芳<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 博纳斯威阀门集团有限公司, 天津 301802)

**摘要:** 针对目前长距离压力输水工程中空气阀口径选取的盲目性, 结合西南某长距离、多起伏输水管线进行停泵水锤数值模拟, 采用 Hammer 水锤软件, 通过特征线法对有压管线中的停泵水锤进行数值计算, 研究不同空气阀口径对停泵水锤的防护影响。结果表明: 此输水工程中, 对应最佳停泵水锤防护效果, 空气阀口径有一个最优值, 且该最优值与管路直径和输水流速有关。

**关键词:** 停泵水锤; 空气阀口径; Hammer 软件

**中图分类号:** TV672.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0052-04

## Influence of Air Valve Diameter on Protection of Water Hammer Caused by Pump-stop in Pressurized Pipelines

XU Fang<sup>1</sup>, LI Zhi-peng<sup>1</sup>, WANG Rong-hui<sup>2</sup>, LIAO Zhi-fang<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2. BNSV Valve Group Limited Company, Tianjin 301802, China)

**Abstract:** Aiming at the blindness of selecting air valve diameter in long distance pressurized water conveyance projects, numerical simulation of pump-stop water hammer was carried out in a long distance and undulating water pipeline in southwest China. Pump-stop water hammer in pressurized pipelines was numerically calculated by Hammer software and characteristic line method, and the effects of different diameters of air valves on the protection of pump-stop water hammer were explored. In the conveyance engineering, the air valve diameter had an optimal value corresponding to the best protective effect of pump-stop water hammer, and the optimal value was related to the pipe diameter and water conveyance flow.

**Key words:** pump-stop water hammer; air valve diameter; Hammer software

在我国西南地区, 因受地形影响和限制, 长距离输水管线具有多起伏的典型特征。为保证输水效率, 在距离泵站较远的管线上采用空气阀进行管路沿线的安全防护越加重要。

虽然空气阀在进气阶段不会出现问题, 而且进气越快越有益于管内负压的消除, 但过快的排气会引起水柱弥合, 产生一种“类弥合水锤”, 尽管这种

水锤与由于汽化产生的水柱分离再弥合水锤不同, 但相关研究表明: 管道正常运行压力为 400 kPa, 而这种“类弥合水锤”引起的最大瞬变压力为 1 000 kPa, 是正常工作的 2.5 倍<sup>[1]</sup>。所以, 在保证空气阀大量进气消除负压的同时, 也要防止过快排气引发的压力升高。

国内外学者研究了空气阀口径对水锤防护效果

的影响,李小周等<sup>[2]</sup>研究发现安装孔口面积比为0.05~0.20的空气阀组可有效消除输水管道的负压并且可以降低正压;杨开林等<sup>[3]</sup>研究发现过大或过小的空气阀口径对水锤防护都是不利的,存在一个最优口径来抑制冲击压力和消除高度真空。

## 1 工程概况

西南地区某长距离、多起伏输水工程的取水规模为 $5.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,取水泵站采用4台深井泵并联,管线全长为12 km,输水管采用DN1 200的PCCP管,沿线高程如图1所示。由于输水距离较远,输水管道起始点高程为40.14 m、终点高程为95.75 m,管线沿程起伏较大,发生停泵水锤时将会造成严重的安全事故,尤其是离泵站较远的管线,泵站的水锤防护措施对其起不到很好的防护效果,采用空气阀对较远的管线进行水锤防护十分重要。

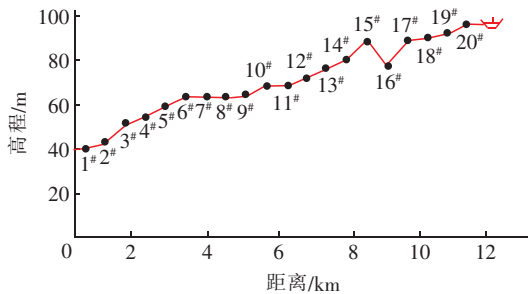


图1 输水管道高程

Fig. 1 Elevation of water conveyance pipeline

## 2 模型建立

Hammer 软件能精确模拟输水管道内瞬态水力现象,瞬态水力计算主要基于特征线法(MOC)对方程进行求解。

水泵采用深井泵,4用1备。单台水泵设计流量为 $2\ 160 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为65 m,额定转速为600 r/min,转动惯量为 $122 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

输水管道采用PCCP管,海曾-威廉系数 $C$ 为120,压能等级为1.6 MPa,管壁厚度为10 mm,公称直径为1 200 mm,水锤波速为1 102.63 m/s。

本次模拟采用注气微排阀,因为其进排气能力具有很大的双向不平衡性,进排气孔口直径比可达 $(1.4:1) \sim (200:1)$ ,可以满足在大量进气破坏真空的条件下,因为排气能力远小于进气能力而不会引起“类弥合水锤”使得管线压力骤然升高,而且由于排气能力小,能够在瞬态过程中截留气囊并使它停留作为弹性气囊,就近吸纳水柱弥合产生的撞击

能量,因此具有很好的水锤防护效果,其结构如图2所示。

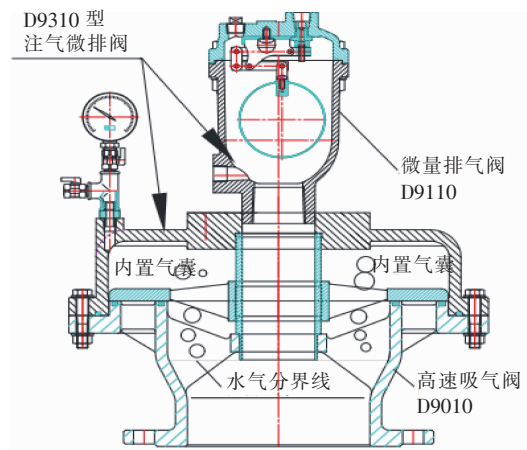


图2 注气微排阀

Fig. 2 Gas injection micro drain valve

## 3 停泵水锤模拟分析

### 3.1 无防护措施的停泵水锤模拟

发生事故停泵时,管道中会产生负压和因汽化引起的水柱分离现象,并且随着压力波的传递,发生水柱弥合而使管道压力骤然升高,引发严重的管道事故、破坏阀门以及危及机组的再次正常启动。发生事故停泵时水锤分析结果如图3所示。

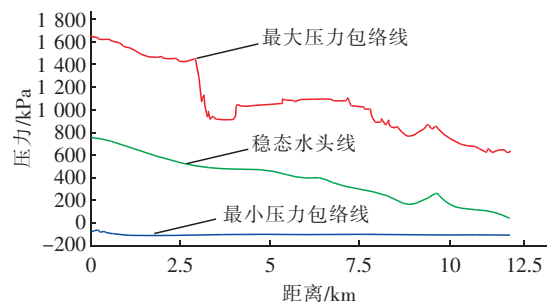


图3 事故停泵时管路全程压力包络线

Fig. 3 Envelop curve of pipeline with pump-stop

从图3可以明显地看出,断电停泵时,泵出口节点最大压力达到165 m水柱(1 m水柱产生的压力约为10 kPa,下同),为水泵稳定工作压力的2.1倍,远超过《泵站设计规范》(GB 50265—2010)的要求,即水泵出口最高压力不超过水泵额定压力的1.3~1.5倍;同时也可以看出,管路全程的最低压力都在零以下,并且从管线500 m左右开始负压达到了-10 m水柱(汽化)。

### 3.2 带防护措施的停泵水锤模拟

为有效消除管路全程存在的负压和抑制弥合水

锤的升压,拟先按照实际工程中在泵后设置止回阀、管路上设置调压塔等相关水锤防护措施。空气阀口径按照管道直径的  $1/10$  即  $D_{\text{valve}} = 120$  mm,布置方式按照坡度大小,经 Hammer 软件模拟计算后,再在负压为  $-10$  m 水柱处设置空气阀。空气阀的布置如图 4 所示,在管路的“膝部”点即 6<sup>#</sup>节点后(3 543 m)、15<sup>#</sup>节点后(8 950 m)、17<sup>#</sup>节点后(9 928 m)以及 4<sup>#</sup>节点后(2 230 m)、7<sup>#</sup>节点后(4 217 m)、8<sup>#</sup>节点后(4 889 m)、11<sup>#</sup>节点后(6 740 m)、12<sup>#</sup>节点后(7 228 m)、13<sup>#</sup>节点后(7 873 m)、16<sup>#</sup>节点后(9 228 m)处设置空气阀。

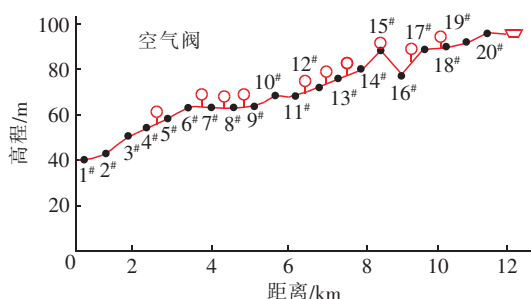


图4 事故停泵时空气阀布置示意

Fig. 4 Arrangement of air valves after pump-stop

布置水锤防护措施后,发生事故停泵时管路全程压力包络线如图 5 所示。可以看出,设置空气阀等水锤防护措施后,管路全程的最高压力明显降低,泵站出口止回阀处压力也降到 132.4 m 水柱,为水泵稳定工作压力的 1.69 倍;全程负压为  $-10$  m 水柱的管路长度减少,压力波动更加平稳。

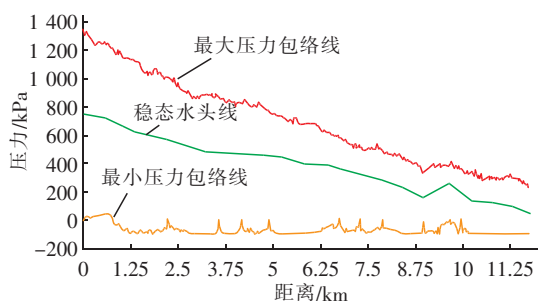


图5 布置防护措施后管路全程压力包络线

Fig. 5 Envelop curve of pipeline with protection measure

### 3.3 空气阀口径对防护效果的影响

改变空气阀口径进行水锤模拟计算,找出最有益于消除负压和抑制水锤升压的口径值。空气阀口径最大取值按照实际工程常用方法,即取管路直径的  $1/8$  ( $D_{\text{valve}} = 150$  mm),同时考察  $D_{\text{valve}} = 120$ 、80、

60、50、40、20 mm 时防护效果。结果表明,当空气阀口径分别为 150、120、80、60、50、40、20 mm 时,管道最大压力值分别为 158、127、129、131、123、125、130 m 水柱。各口径对应的管道全程最大压力包络线如图 6 所示。

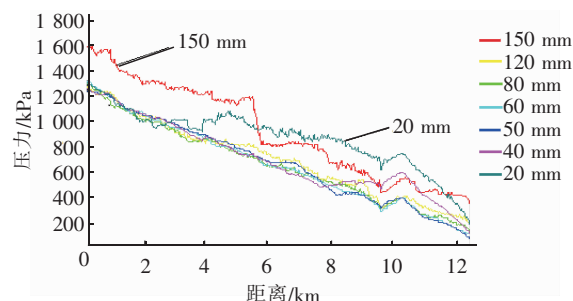


图6 不同空气阀口径对应的管路全程最大压力包络线

Fig. 6 Envelop curve of pipeline with different air valve diameters

由图 6 可以看出,随着空气阀口径的减小,管道最大压力也减小,在  $D_{\text{valve}} = 150$  mm 时,全程最大压力线明显高于其他口径下的;当  $D_{\text{valve}} = 20$  mm 时,在管路的前 3 750 m 最大压力与其他口径相差不大,之后出现明显上升趋势,且超过  $D_{\text{valve}} = 150$  mm 的最大压力;当  $D_{\text{valve}} = 60$  mm 左右时管道压力波动最为稳定,且负压也得到了明显消除(见图 7)。因此,空气阀口径并不是越大或越小越好,而是存在一个适当的值有利于消除负压和抑制最大压力上升。

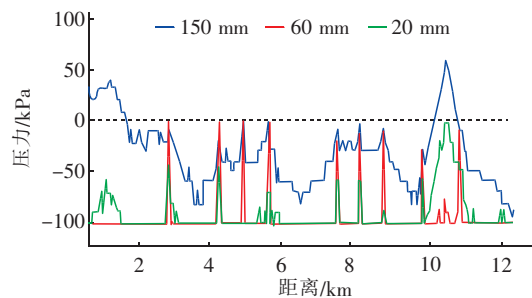


图7 不同空气阀口径下管路全程最小压力

Fig. 7 Minimum pressure of pipeline with different air valve diameters

### 3.4 空气阀最优口径的影响因素

以空气阀经过优化布置的方式为基础,通过改变此输水工程的管径以及通过流量控制阀改变管内流速和流量,研究空气阀最优口径的影响因素。工况 1:管径为 1 200 mm、流速为 1.41 m/s、流量为 1 600 L/s;工况 2:管径为 1 600 mm、流速为 1.2 m/s、流量为 2 410 L/s;工况 3:管径为 1 600 mm、流速

为0.8 m/s、流量为1 600 L/s。工况1~3的管路全程最大压力包络线如图8所示。

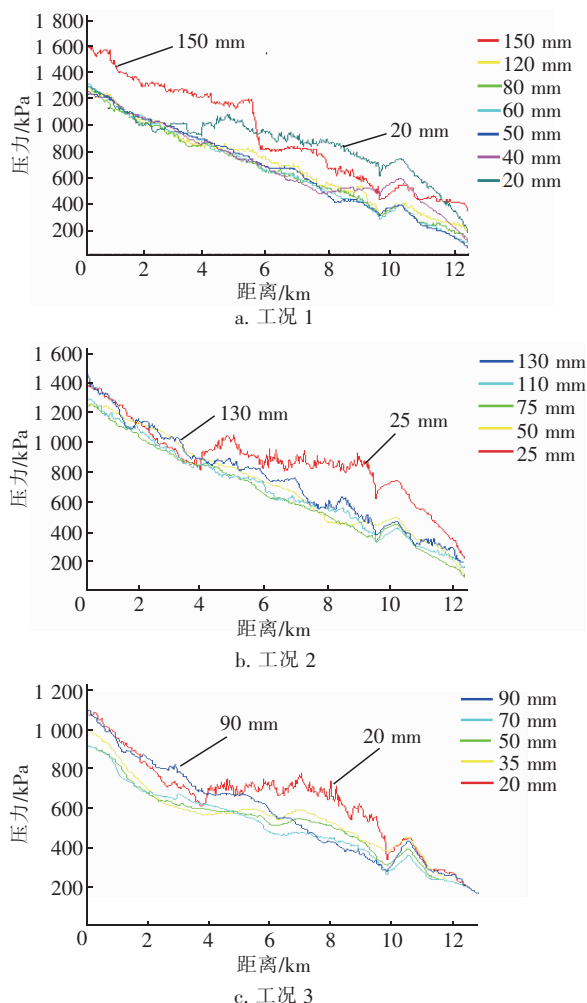


图8 工况1~3不同空气阀口径下管路全程最大压力包络线

Fig. 8 Envelop curve of pipeline with different air valve diameters in condition 1-3

从图8可以得出,工况2的最优空气阀口径在75 mm左右,工况3的最优空气阀口径在50 mm左右。结合《泵站设计规范》要求以及不同工况下的模拟数据,可以归纳出此输水工程的空气阀最优口径 $D$ 与管道直径 $DN$ 、流速 $v$ 的关系符合下式:

$$D = 0.0357 \cdot DN \cdot v \quad (1)$$

#### 4 结论

① 通过 Hammer 软件采用特征线法对事故停泵引发的水锤进行数值模拟,研究不同空气阀口径对停泵水锤防护效果的影响,选取合理的空气阀口径,能够达到理想的停泵水锤防护效果。

② 空气阀口径选取过大(本研究为大于

120 mm),虽能有效消除负压,但会因大量空气进入管道形成“气囊”,后经压缩形成“类弥合水锤”,产生巨大压力;空气阀口径选取过小(本研究为小于40 mm),虽可以防止口径选取过大时的“类弥合水锤”问题,但会因进气量小负压消除不理想而引发断流弥合水锤。对应最佳停泵水锤防护效果,空气阀口径有一个最优值,且该最优值与管路直径和输水流速的大小有关。

#### 参考文献:

- [1] 李菊先,侯丽娜,刘长垠. 有压输水管道进排气阀设置[J]. 河南科学,2012,30(8):1130-1132.  
Li Juxian, Hou Lina, Liu Changyin. Study on the setting inspiration exhaust valve in pressured delivery conduit [J]. Henan Science, 2012, 30(8): 1130-1132 (in Chinese).
- [2] 李小周,朱满林,陶灿. 空气阀型式对压力管道水锤防护的影响[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(7):599-605.  
Li Xiaozhou, Zhu Manlin, Tao Can. Impacts of type of air valve on water hammer protection in pressurized pipelines [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(7): 599-605 (in Chinese).
- [3] 杨开林,石维新. 南水北调北京段输水系统水力瞬变的控制[J]. 水利学报,2005,36(10):1176-1182.  
Yang Kailin, Shi Weixin. Control of pipeline hydraulic transients in South to North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1176-1182 (in Chinese).



作者简介:徐放(1993-),男,四川乐山人,硕士研究生,研究方向为流体机械与水力过渡过程。

E-mail:3221858@qq.com

收稿日期:2019-07-12