

# 事故停泵水锤对压力管道的影响

姚青云 李志敏

(宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**介绍了大战场泵站的基本情况,对该泵站由于事故停泵水锤造成压力管道破坏的现场进行了调查。基于水锤理论并运用水锤特征线法,建立了事故停泵水锤计算的数学模型,模拟了事故停泵水力过渡过程中的水泵参数及压力变化过程,绘制了该泵站事故停泵的最大、最小水头包络线。通过计算结果及对泵站压力管道破坏情况的分析,得出此次管道破裂是由于事故停泵产生过高水锤压力,沿管线多处出现负压,管道存在质量问题等原因造成。提出的解决方法是更换损坏的管道,同时在管道凸起(3<sup>#</sup>镇墩)K0+075处及(6<sup>#</sup>镇墩)K0+201处设进排气补气阀,防止事故停泵时管道产生过大的负压。

**关键词:**水锤;事故停泵;压力管道;水头包络线

中图分类号:TV7 文献标识码:A 文章编号:1005-6254(2006)06-0045-03

## Effect of water hammer to pressure pipes for pumping accidents

YAO Qing-yun, LI Zhi-min

(College of Civil and Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** An introduction of the Dazhanchang pumping station and an investigation of the broken pressure pipes caused by pumping accident in the pumping station are presented. According to the theory of the water hammer and its characteristic, the calculating model of the pumping accident is built. The change of the water pump parameter and the piping pressures in pumping accident transition process are simulated, and the highest and lowest head envelope curves are obtained. By analysing the result combined with the local investigation, the main reason is deduced. Pumping accidents result in excessively high water hammer pressure. The negative pressure occurs along pipes. The quantity of the pipes can not meet the design requirement and so on. The measures to deal with the problem are given as following: changing the destructive pipes and installing the air inlet-outlet valve on 3<sup>#</sup> and 6<sup>#</sup> anchor blocks can avoid the excessively high negative pressure.

**Key words:** the water hammer; pumping accident; pressure pipe; head envelope curve

在压力管流中因流速剧烈变化引起动量转换,从而在管路中产生一系列急骤的压力交替变化的水力撞击现象称为水锤现象<sup>[1]</sup>。水锤现象的延续时间虽然短暂,但它会造成严重的工程事故。本文针对大战场泵站事故停泵管道爆裂的原因进行分析计算,得出了压力管道爆裂的原因,提出了解决办法。

### 1 泵站基本情况

大战场泵站修建于1990年,2000年进行了改造。泵站设计流量为3.5 m<sup>3</sup>/s,净扬程44.045 m,总扬程49 m。安装水泵7台,其中28SA-10A型水泵

收稿日期:2006-06-26

作者简介:姚青云(1957-),男,宁夏平罗人,教授,主要从事泵站理论与技术的研究。

李敏(1977-),女,吉林松原人,硕士研究生,主要从事泵站理论与技术的研究。

1 台,配套电机 Y500 - 8/630 ;20SH - 9A 型水泵 6 台,配套电机 Y450 - 6/450。压力管道为两排  $\phi 1.2$  m 的预应力混凝土压力管,单排压力管道长为 1 100 m。水泵的出口装有 D741X - 10 液控缓闭止回蝶阀。

## 2 事故停泵管道爆裂情况

事故发生于 2005 年 7 月 12 日下午 6 时左右,当时泵站开机 6 台,其中 3 台 20SH - 9A 型水泵并联用 1.2 m 管道输水;1 台 28SA - 10A 型水泵和 2 台 20SH - 9A 型水泵并联用另外 1.2 m 管道输水。由于电网突然停电,泵站机组突然事故停机,出口液控缓闭止回阀按照设定的关闭程序关闭。关闭程序为快关  $65^\circ$ ,慢关  $25^\circ$ ,快关时间 5 s,慢关时间 19 s。结果造成泵站 7 节预应力混凝土压力管出现不同程度的爆管现象,当时裂缝处水柱高度达 3 ~ 4 m 左右。右侧有 1 处(第 3 节管)管道破坏,左侧共有 6 处管道破坏,分别是:第 6,11,21,23,24 和 102 节管。爆管发生在 K0 + 000 至 K0 + 650 段。从爆管裂缝分布看,管道顶部、下部、两侧均有,裂缝均为纵向,裂缝长度为 100 mm 到 500 mm 不等。从现场更换下来的管道看,在水击压力作用下,钢筋产生变形,从而产生纵向裂缝,如图 1 所示。

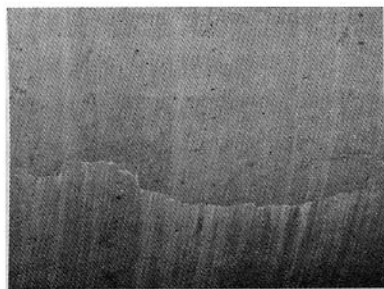
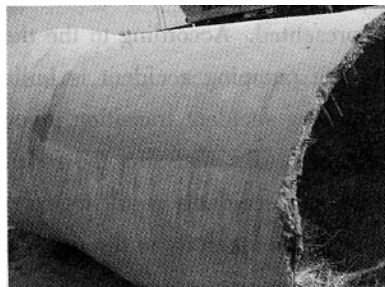


图 1 事故停泵管道破坏图

## 3 事故停泵的模拟分析

针对该泵站的边界条件及运行工况,采用特征线法建立了事故停泵水锤分析计算数学模型,利用

计算机进行模拟计算。

### 3.1 水锤特征线方程

特征线法基本原理是将以偏微分方程表示的水锤基本方程组转化为在特征线上的常微分方程,用差分法求解常微分方程。

如果在  $t_0$  时刻分别在管路点 A 点和 B 点生成或传出一正向水锤波和反向水锤波,经  $\Delta t$  时段后到达 P 点,传播速度为  $a$ 。如令 A、B 两断面在  $t_0$  时刻的流量和水头分别为  $Q_A$ 、 $H_A$  和  $Q_B$ 、 $H_B$ ;P 断面在  $t_0 + \Delta t$  时刻流量和水头分别为  $Q_P$  和  $H_P$ ,那么可用差分形式分别表示 A、P 断面和 B、P 断面流量和水头变化关系式为<sup>[2]</sup>:

$$Q_P = C_P - C_a H_P \quad (1)$$

$$Q_P = C_n - C_a H_P \quad (2)$$

令

$$C_P = Q_A + C_a H_A - C_f Q_A | Q_A | \quad (3)$$

$$C_n = Q_B - C_a H_B - C_f Q_B | Q_B | \quad (4)$$

式中  $Q_P$  为在  $t_0 + \Delta t$  时刻 P 点的流量  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_P$  为在  $t_0 + \Delta t$  时刻 P 点的水头  $\text{m}$ 。

其中

$$C_a = gA/a$$

$$C_f = f\Delta t/2DA$$

式中  $\Delta t$  为计算时段  $\text{s}$ ;  $g$  为重力加速度  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $D$  为管道直径  $\text{m}$ ;  $A$  为管道断面积  $\text{m}^2$ ;  $a$  为水锤波传播速度  $\text{m}/\text{s}$ ;  $f$  为管道摩阻系数。

如果沿管长任意两点 A 和 B 在  $t_0$  时刻的流量和水头值已知,即可由上式(1)、(2)求出 P 点在  $t_0 + \Delta t$  时刻的流量和水头值为:

$$Q_P = (C_P + C_n)/2 \quad (5)$$

$$H_P = (C_P - Q_P)/C_a \quad (6)$$

对于泵出口和管道出口处,下一时段的流量和扬程只能根据边界条件和两处特征方程中的一个联立求解。泵出口断面必须用负特征方程和水泵边界方程等联立求解,本文略。

### 3.2 管路出口与出水池处边界方程

管路出口与出水池处的边界方程根据正特征方程与出水池边界方程联立求解下一时段的流量和扬程。

管路出口特征方程

$$Q_{Pn} = C_n + C_a H_{Pn} \quad (7)$$

式中  $Q_{Pn}$  为在  $t_0 + \Delta t$  时刻管路出口断面的流量  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_{Pn}$  为在  $t_0 + \Delta t$  时刻管路出口断面的水头  $\text{m}$ 。

该泵站出水管末端垂直上升 18 m 与出水塔相连,出水管口高于出水池设计水位,事故停泵出水塔及出水干渠水不会倒流,出口断面的水头随倒流水

量的增加而下降,计算时根据倒流量计算出下降高度.管路出口水头方程为

$$H_p = H - h \quad (8)$$

式中  $H$  为泵站净扬程,  $m$ ;  $h$  为管路出口水头下降值,  $m$ , 根据计算段内倒流量除以管道断面积求得.

### 3.3 计算结果

事故停泵时,出口液控缓闭止回蝶阀关闭规律为快关  $65^\circ$ ,慢关  $25^\circ$ ,快关时间  $5\text{ s}$ ,慢关时间  $19\text{ s}$ .按事故停泵时的边界条件及运行工况,用计算机模拟计算,当1台28SA-10A型水泵和2台20SH-9A型水泵并联运行,事故停泵出口断面最大水锤压力为  $56.079\text{ m}$ ,28SA-10A型水泵最大倒转转速为额定转速的  $-82\%$ ,20SH-9A型水泵最大倒转转速为额定转速的  $-78\%$ ,事故停泵对水泵机组没有产生危害.由计算可知,管道多处出现负压,没有发生水柱分离现象.事故停泵最大、最小压力水头包络线如图2所示.

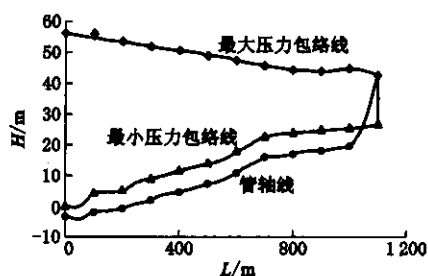


图2 泵站压力包络线

## 4 管道爆裂的原因分析

通过对泵站压力管道爆管的现场勘查及分析计算认为:

(1) 该泵站净扬程  $44.045\text{ m}$ ,水泵额定扬程  $50\text{ m}$ .通过对水泵正常运行工作点确定知,1台28SA-10A型水泵和2台20SH-9A型水泵并联运行时,单泵流量分别为  $1.117\text{ m}^3/\text{s}$  和  $0.527\text{ m}^3/\text{s}$ ,泵出口压力水头分别为  $48.824\text{ m}$  和  $49.018\text{ m}$ .3台20SH-9A型水泵并联运行时,单泵流量为  $0.531\text{ m}^3/\text{s}$ ,泵出口压力水头为  $47.314\text{ m}$ .事故停泵时,阀后最大水锤压力水头为  $56.079\text{ m}$ ,比正常压力水头高  $7.255\text{ m}$ ,这是造成管道破坏的原因之一.

(2) 计算结果表明,按发生事故时阀门的关闭规律模拟计算知,事故停泵管道沿线出现负压,造成压力波动较大,也是造成管道破坏的因素之一.

道离泵房约  $520\text{ m}$  左右,此处管轴线高为  $14.89\text{ m}$  (泵出口管轴线为基准面),最大水锤压力水头  $48\text{ m}$ ,该断面相对压力水头为  $33.11\text{ m}$ ,仍出现管道裂缝破坏现象.

(4) 事故停泵时现场值班人员看到管道裂缝宽度达  $30\sim 40\text{ mm}$ ,从裂缝处喷出来的水柱高达  $3\sim 4\text{ m}$ ,事故过后裂缝闭合,管道裂缝明显,钢筋没有被拉断.

(5) 计算结果表明,事故停泵时28SA-10A型水泵机组最大倒转转速为额定转速的  $-82\%$ ,20SH-9A型水泵机组最大倒转转速为额定转速的  $-79\%$ .事故现场工作人员观测机组出现倒转,事故对水泵机组没造成损坏.表明两阶段关闭蝶阀对防止事故停泵时机组倒转、倒流有明显的效果.

经过分析,本次事故停泵造成管道破坏的原因是由于事故停泵管道产生过高的水锤压力,沿管线多处出现负压引起压力波动现象,管道质量问题是造成爆管的原因所在.另外,出口液控阀关闭时间短,出水管局部凸起点没有进排气补气阀,对事故停泵管道破坏有一定影响.

## 5 解决办法

(1) 更换损坏的管道.

(2) 经计算机模拟计算,泵出口水两阶段关闭蝶阀按快关  $60^\circ$ ,慢关  $30^\circ$ ,快关时间  $7\text{ s}$ ,慢关时间  $30\text{ s}$  的关闭规律较为合理.

(3) 在管道凸起(3#镇墩)  $K0+075$  处及(6#镇墩)  $K0+201$  处设进排气补气阀,防止事故停泵时管道产生过高的负压.

## 6 结 论

(1) 事故停泵水锤分析计算对合理确定管道设计压力,采取相应的防护措施非常重要.由于各种泵站参数、运行工况、管线布置等条件不同,在设计时必须通过进行事故停泵水锤分析计算来确定.

(2) 在选择管道设计压力时,必须按发生事故时的最大压力来考虑,确保事故停泵时管道的安全.

(3) 两阶段关闭阀对防止事故停泵机组倒转、倒流效果是好的,但必须结合泵站的边界条件和运行工况进行事故停泵水锤分析计算来确定,才能起到防护效果.

(3) 两根主管共有7处爆管,其中第104节管

(下转第52页)

水平面,通孔与环行管路相通并与多冲头的喷嘴相通。当排污泵抽送污水污物时,有一部分污水(称为返回流)经滤网过滤后通过环行管路从各个冲头的喷嘴喷向污水池中的沉淀物,经高压水把沉淀物冲击、搅拌成悬浮物,通过无堵塞排污泵排至池外。

3 高效无堵塞泵发展展望

- (1)进一步完善和发展高效无堵塞泵的设计理论与方法,增强泵的通过能力,提高泵的效率 and 运行可靠性,降低泵的振动和噪声。
- (2)进一步开发具有三维实体造型功能的高效无堵塞泵 CAD 软件,并且与 CAM、CAPP 技术相结合,形成泵的计算机集成制造系统 CIMS。
- (3)继续加强两相流理论和数值计算方法的研究。由于目前两相流理论大部分都采用近似模型和经验公式,理论与事实存在较大误差。因此,建立和完善两相流理论不仅具有重要的学术价值,而且还具有广泛的应用前景。
- (4)开发集 CAD 与 CFD 功能于一体的软件<sup>[11]</sup>。同时,在 CFD 计算的基础上,进一步开展泵性能预测工作的研究,并与 CFD 一起形成一个完整的系统,最终为泵的反问题求解、改善泵的性能打下良好的基础。
- (5)加强流场测试技术的研究。数值模拟的结果最终要与试验结果相比较,才能检验数值计算方法的正确与否。PIV、PDPA 技术的发展,为三维流场的测试提供了可能。
- (6)加强高效无堵塞泵材料及磨蚀机理的研究。搞清楚泵的磨蚀机理,对于合理设计和延长泵的使用寿命具有重要意义。在高效无堵塞泵中应积极

推广使用不锈钢、工程塑料等防腐耐磨材料。

(7)针对目标市场进行多样化、特种化研究与开发,以满足不同介质输送的要求。即根据输送介质和运行条件的特点,设计、开发、制造通过能力适当,效率高,可靠性高,运行安全性好的产品。

参考文献 (References)

[ 1 ] KSB A G. Sewage pump designed for high efficiency [ J ]. *World Pumps* , 1996( 4 ) : 42 - 43.

[ 2 ] Frost, Sullian. Submersible pumping in the European sludge treatment industry[ J ]. *World Pumps* , 1998( 7 ) : 26 - 29.

[ 3 ] 施卫东. 高效无堵塞泵的研究开发及内部流场数值模拟[ D ]. 镇江: 江苏大学 2006.

[ 4 ] 施卫东. 污水泵水力设计综述[ J ]. *流体机械* , 1997 , 25( 8 ) : 26 - 29 , 37.

[ 5 ] 关醒凡. 现代泵技术手册[ M ]. 北京 : 宇航出版社 , 1995.

[ 6 ] 关醒凡, 张涛, 魏东, 等. 无堵塞泵设计及结构研究[ J ]. *排灌机械* 2003 21( 4 ) : 1 - 4.

[ 7 ] 刘厚林. 流道式无堵塞泵 CAD 软件开发及三维不可压湍流计算[ D ]. 镇江: 江苏理工大学 2001.

[ 8 ] 刘厚林, 关醒凡. 双流道叶轮的设计方法[ J ]. *流体机械* , 1999 27( 9 ) : 15 - 17.

[ 9 ] 施卫东. 潜水电泵的结构与安装形式[ J ]. *中国农村水利水电* , 1999( 8 ) : 34 - 36.

[ 10 ] 施卫东, 关醒凡, 曹卫东. 污水污物潜水电泵的研究现状与典型结构分析[ J ]. *排灌机械* , 1997 , 15( 3 ) : 9 - 11.

[ 11 ] 王福军, 黎耀军, 王文娥, 等. 水泵 CFD 应用中的若干问题与思考[ J ]. *排灌机械* 2005 23( 5 ) : 1 - 10.

( 责任编辑 贾国方 )

( 上接第 47 页 )

- (4) 加强管子的出厂质量检验,同时对预应力混凝土管子的制作、运输、装卸、施工、安装等各环节要认真把关,确保各个环节的质量控制。
- (5) 对长管道及管线局部凸起处要设进排气补气阀,防止事故停泵管道中产生过大的负压。

参考文献 (References)

[ 1 ] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华, 等. 停泵水锤及其防护[ M ]. 第二版. 北京 : 中国建筑工业出版社 2004 : 1.

[ 2 ] 栾鸿儒. 水泵及水泵站[ M ]. 北京 : 水利电力出版社 , 1993 : 262 - 266.

[ 3 ] 梁兴, 刘梅清, 张进国, 等. 空气罐对输水管道水锤的防护研究[ J ]. *排灌机械* 2005 23( 6 ) : 16 - 18.

[ 4 ] 蒋桂林, 周龙才, 冯军, 等. 惠州深能源丰达电厂取水工程水锤计算与防护[ J ]. *排灌机械* 2005 23( 1 ) : 15 - 18.

[ 5 ] 贾伟智. 有压输水管道的排(进)气问题研究[ J ]. *人民黄河* 2004 26( 9 ) : 24 - 26.

[ 6 ] 耿灵生, 郝晓晖. 多功能水泵控制阀在水厂的应用[ J ]. *排灌机械* 2004 22( 4 ) : 20 - 22.

[ 7 ] 杨远东, 邓志光. 停泵水锤计算及其防护措施[ J ]. *中国给水排水* 2000 16( 5 ) : 29 - 32.

( 责任编辑 张文涛 )