

高压水除鳞系统蓄势器参数对水锤的影响

游飞, 张新铭, 王济平

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030)

摘要: 水锤是影响高压水除鳞系统安全运行的主要因素。在除鳞系统中安装蓄势器能够减小水锤的影响, 根据除鳞系统的运行要求确定蓄势器的参数。运用特征线法建立高压水除鳞系统水锤的数值计算模型, 分析蓄势器的体积大小对系统的影响。分析表明: 随着蓄势器体积的增加对水锤的防护效果也越好。在实际中蓄势器的选定要结合工程实际情况进行确定。

关键词: 高压水除鳞; 水锤; 蓄势器; 特征线法; 水锤计算

中图分类号: TV134; X703

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)05-0157-04

Effect of accumulator parameter on water hammer in system of high pressure water descaling

YOU Fei, ZHANG Xinming, WANG Jiping

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Water hammer is the key factor which affects the safety operation of high pressure water descaling system. The installation of accumulator in descaling system can reduce the influence of water hammer. According to the operation requirement of descaling system, the parameters of accumulator were determined. The paper used characteristic method to establish numerical calculation model of water hammer of the high pressure water descaling system and analyze the influence of accumulator volume on the system. The analysis shows that with the increase of accumulator volume, the protection effect of water hammer is better. The choice of accumulator must combine with engineering condition in practice.

Key words: high pressure water descaling; water hammer; accumulator; method of characteristics; water hammer calculation

随着我国经济建设步伐的加快,对钢铁的需求量和质量也越来越高。除鳞是钢铁生产中极其关键的一步,有利于提高钢铁的质量和企业的经济效益^[1]。目前采用最普遍的除鳞方式是高压水除鳞,其主要优点是:操作简单、除鳞效率高^[2]。在除鳞过程中由于阀门的快速开启和关闭会导致管道内流体的状态急剧变化,这种剧烈的压力变化称为水锤,严重时将会影响除鳞系统的安全运行^[3]。蓄势器作为高压水除鳞系统的重要设备对水锤具有一定的防护效果。本文通过计算确定蓄势器的参数,并结合实例分析发生水锤时蓄势器容积的大小对管道压力的影响。

1 除鳞系统及蓄势器参数的计算

1.1 高压水除鳞系统

图1所示为典型高压水除鳞系统,其主要有高

压除鳞泵、蓄势器、除鳞阀、喷嘴等设备。其工作过程是:工业用水经高压泵加压后经管道和喷嘴将高压低速的水流变为低压高速的水流打击钢板,借助高速的水流实现除鳞。阀门快速开启或关闭易使高压管道内水流产生水锤,在管道上安装蓄势器对管道的水锤有很明显的防护作用^[4]。蓄势器在管道中有两个作用:①吸收管道的水锤冲击;②调节系统的流量。

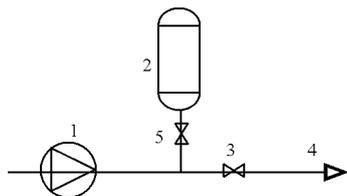
图1所示的典型高压水除鳞系统蓄势器内部结构:上面部分是压缩空气;下面部分是水。由于空气的可压缩性,蓄势器内水位在最高压力和最低压力之间波动。当系统中水量波动时,由空气的压缩和膨胀减小了水击的作用^[5]。此外,各喷嘴的开关时序不同,管道内的水流量将会出现波动。高压泵提供的水量为系统的平均流量,在喷嘴的流量高出泵

收稿日期:2013-05-09; 修回日期:2013-06-27

基金项目:国家大学生创新性试验资助项目(091061131)

作者简介:游飞(1985-),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为动力工程及工程热物理工程应用。

所提供的流量时由蓄势器中的水量补充,当泵提供的流量大于喷嘴的流量时多余的水便储存到蓄势器中。因此合理的设计蓄势器参数对高压水除鳞系统安全保护起到重要的作用同时也能够达到很好的经济性。



1.高压除磷泵 2.蓄势器 3.除磷阀
4.除磷喷嘴 5.阀

图1 高压水除鳞典型管道系统

1.2 蓄势器参数的计算

蓄势器在高压水除鳞系统中作为补充高压泵流量的设备,可以计算出一个除鳞周期内蓄势器提供的流量。

一个周期内喷嘴的出流量应等于泵流量和蓄势器流量之和。图2所示系统有 N 个除鳞喷嘴组,每个喷嘴组有 n 个喷嘴,每个喷嘴单位时间的流量为 Q_n ,除鳞泵单位时间的流量为 Q_p ,每个喷嘴组的工作时间 t 是由钢板的长度 l 和滚轴的运动速度 v 决定的, $t = l/v$ 则在一个除鳞周期内 T 由蓄势器提供的水流量 Q_w 为:

$$Q_w = \sum_{i=1}^N nQ_n t_i - TQ_p \quad (1)$$

式中: $\sum_{i=1}^N nQ_n t_i$ 表示一个除鳞周期内流过喷嘴的流量。在蓄势器补水和放水过程中可近似认为是绝热过程。由绝热过程方程:

$$pV^k = C \quad (2)$$

式中: k 为绝热指数; p 为蓄势器中压缩空气的压强; V 为蓄势器中压缩空气的体积。选蓄势器中的压缩空气为研究对象,其膨胀和压缩过程满足绝热方程式。取在蓄势器放水和补水的任意时刻对(2)式化简可以得到:

$$V = \frac{\alpha^{\frac{1}{n}}}{1 - \alpha^{\frac{1}{n}}} V_0 \quad (3)$$

式中: $\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$ 称为压力波动系数,其中 P_{\min} 和 P_{\max} 为压缩空气对应的最小和最大压力。通过(1)式和(3)式可以分别求出蓄势器中液体部分和气体部分的体积。

2 水锤的数值计算

水锤的数值计算包括微分方程和求解的边界条件。水锤微分方程的理论基础源于水流运动的力学规律和连续性原理,包括运动方程和连续性方程。水击的基本方程全面反映了有压管流中非恒定流流动规律,包含了水头压力和水流流速的变化规律,同时也是研究水力过渡过程的基础^[6]。

2.1 水锤计算的微分方程

由微小水体的受力情况,根据牛顿第二定律可以推导出在管道中可压缩不稳定流动流体的运动方程为:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fv |v|}{2D} = 0 \quad (4)$$

连续性方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} - v \sin \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

式中: H 为管路中的水头; v 为管内流体的平均流速; f 为管路摩阻系数; a 为水击波传播的速度; g 为重力加速度; D 为管道直径; t 为时间; x 为从管道左端算起的距离; α 为管路与水平面的夹角^[7]。

对运动方程和连续性方程进行简化和推导,得到便于编程的特征线方程,分别有沿正向的正水锤模型和沿负向的负水锤模型:

$$C +: H_p = C_A - BQ_p \quad (6)$$

$$C -: H_p = C_B + BQ_p \quad (7)$$

$$C_A = H_A + BQ_A - R |Q_A| Q_A \quad (8)$$

$$C_B = H_B + BQ_B + R |Q_B| Q_B \quad (9)$$

式中: $C +$ 和 $C -$ 为特征线; Q 为管道流量; $B = 4a/(\pi g D^2)$ 为管道特性系数; $R = 8f \Delta x/(\pi g D^5)$ 为管道摩擦特性系数; a 为水击波波速; D 为管内径; Δx 为两个节点之间的距离,下标 p, A, B 分别表示 t 时刻 i 节点、 $t - \Delta t$ 时刻 $i - 1$ 节点、 $t - \Delta t$ 时刻 $i + 1$ 节点的水头和流量值,由式(8)和(9)可求出除鳞供水管道中间各节点的水头和流量值^[8]。

2.2 水锤计算的边界条件

2.2.1 高压泵的边界节点方程 高压水管道上游为除鳞泵,由于除鳞过程中除鳞泵连续工作,所以上游边界条件是离心泵特性曲线所规定的 $Q - H$ 关系,用 n 次多项近似描述,此关系为:

$$H = \sum_{i=0}^n b_i Q^i \quad (10)$$

式中:各项系数 b_i 由水泵性能曲线拟合而得。取 $n = 2$ 代入特征线方程(8)可得除鳞泵出口处的边界节

点方程:

$$Q_p = \frac{1}{2b_2} [B - b_1 - \sqrt{(B - b_1)^2 + 4b_2(C_B - b_0)}] \quad (11)$$

2.2.2 喷射阀边界节点方程 喷射阀瞬变流动状态下的水头为:

$$H = H_0 Q^2 / (\tau Q_0)^2 \quad (12)$$

将式(9)代入式(3)可得喷射阀边界节点方程

$$Q = -BC_c + \sqrt{(BC_c)^2 + 2C_c C_A} \quad (13)$$

式中: $C_c = \tau^2 Q_0^2 / (2H_0)$, $\tau = (1 - t/t_V)^m$ 为喷射阀的无量纲开度; t_V 为开关阀动作时间; m 为阀门开度指数,下标0表示喷射阀全开时的稳定流动状态。

2.2.3 蓄势器边界节点方程 对于蓄势器,视蓄势器内气空间气体为理想气体,忽略水空间液体的压缩性和蓄势器壁的弹性,并假设蓄势器中的气体压缩性遵循绝热过程。

蓄势器边界节点水头为:

$$H = H_a + \lambda Q + Z \quad (14)$$

蓄势器内水位高度变化为:

$$\Delta Z = Q \Delta t / A \quad (15)$$

以上三式中, H_a 为蓄势器内气体压力; k 为绝热指数; λ 为局部阻力损失系数; Z 为蓄势器内水位高度; A 为蓄势器横截面积; ΔZ 为一个时间步长 Δt 内的蓄势器水位变化量。

式(16) ~ (17) 即为蓄势器边界节点方程。需要补充的关系为 $Q = Q_1 - Q_2$ 和 $H \approx H_1 \approx H_2$ (下标1、2分别表示 t 时刻蓄势器上、下游侧节点)。

对于管路中的管件,则仅考虑其局部阻力,例如

对于二进一出的三通下游边界节点,有 $H = H_1 + \Delta H, Q = Q_1 + Q_2$ (ΔH 为局部阻力损失,下标1、2分别表示两个上游节点)。

3 蓄势器体积对水锤影响实例分析

以管道和阀门组成的典型管道系统(图1)为例,对蓄势器在不同参数和工况下的水击防护特性进行研究。该管道系统的主要参数有:上游水头 H 为2000 m,稳态流量 Q 为0.2 m³/s,管径 D 为0.3 m,管长 L 为2400 m,波速 a 为1200 m/s,阀门关阀时间 t_c 为3s,总计算时间 t_{max} 为30 s。

分别选蓄势器体积分别为5、10、15 m³ 时对管道水击压力变化产生影响见图3,当管道系统参数一定,蓄势器安装位置相同,体积不同蓄势器对水击控制能力如图。蓄势器初始体积小,管道压力波动大,波峰波谷尖锐,周期短;蓄势器初始体积大,管道压力整体波动平缓,周期长;随着蓄势器体积的增大,管道水击最高压力出现的时刻向后推迟,且最高最低水击压力均降低。由此可见,在输水管道系统中增大蓄势器体积,能有效的减小水击压力,提高整个系统的防护性能。但是在管道输水系统中,蓄势器体积的大小要受到经济、空间等因素的影响。

蓄势器内压力波动如图4所示,压力波动趋势与阀门处波动趋势基本一致(图3)。进出蓄势器内流量变化如图5所示,在关阀的最初几秒内,进入蓄势器的流量迅速增加,蓄势器体积越大,流量波动范围越大,波动周期越长,蓄势器体积越小,流量波动范围越小,波动周期越短。

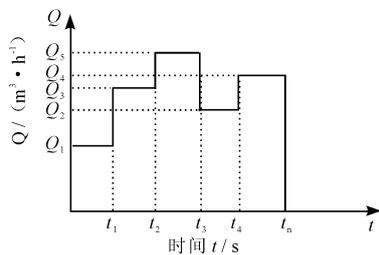


图2 一个周期内喷嘴的流量

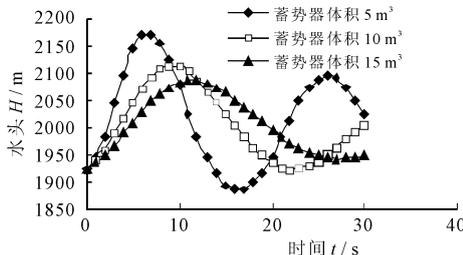


图3 喷射阀瞬态压力变化

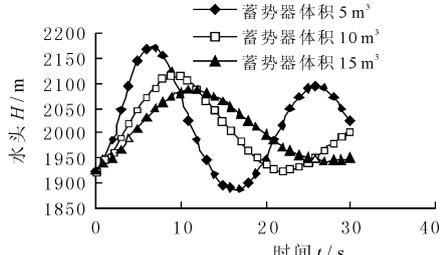


图4 蓄势器内瞬态压力变化

比较关闭阀门后沿管道的最高水击压力和最低水击压力如图6、7所示,发现管道的最高压力、最低压力都发生在管道下游的阀门处;随着蓄势器体积的增加,沿管道的最大水击压力的变化趋势越不明显;蓄势器体积越小,水击压力的幅值越越大,随着蓄势器体积的增加,水击最小压力的幅值减小,但增加的趋势不明显,蓄势器体积为10和15 m³ 的最小

水击压力拟合曲线基本重合。蓄势器体积为5 m³ 时,最高水头与最低水头的差值为288.634 m;蓄势器体积为10 m³ 时,最高水头与最低水头差值为197.18 m;蓄势器体积为15 m³ 时,最高水头与最低水头差值为170.149 m;由此可见,蓄势器的体积越大,对水击的防护特性越好。

4 结 语

本文分析了高压水除鳞系统中蓄势器体积的大小对管道水锤的防护作用,计算分析结果表明:蓄势

器的体积大小对管道中水锤有不同的防护效果,在管道中蓄势器体积越大,管道内压力波动越平缓。在实际工程运用中蓄势器体积的选取要结合空间、经济性进行设计和选取。

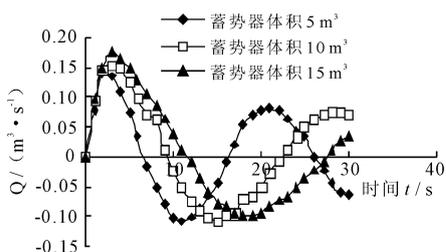


图5 进出蓄势器流量变化

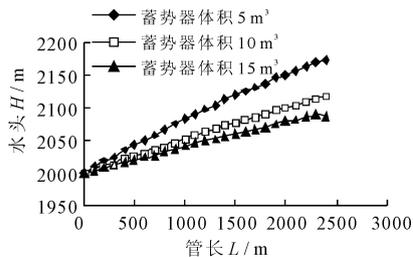


图6 最高压力比较

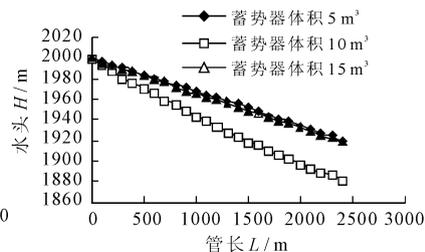


图7 最低压力比较

参考文献:

- [1] 李维芳. 我国钢铁行业现状分析与发展方向探索[J]. 经济问题探索, 2004(12): 27-30.
- [2] 薛念福, 李里, 陈继林等. 热轧带钢除鳞技术研究[J]. 钢铁钒钛, 2003, 24(3): 52-59.
- [3] 王学芳, 叶宏开, 汤荣铭, 等. 工业管道中的水锤[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 34-44.
- [4] 罗晴, 习磊朋, 孟胜利, 等. 高压水除鳞系统中蓄势器对水击防护的特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(2): 58-61+65.

- [5] 马雅丽, 黄志坚. 蓄能器实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 2007: 47-48.
- [6] Afshar M H, Rohani M. Water hammer simulation by implicit method of characteristic[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(6): 851-859.
- [7] 刘竹溪, 刘光临. 泵站水锤及其防护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 1-2.
- [8] 苏联 M. A. 莫斯特柯夫. 水锤计算[M]. 北京: 电力工业出版社, 1955: 41-42.

《水资源与水工程学报》征稿简则

《水资源与水工程学报》系教育部主管、西北农林科技大学主办的国内外公开发行的学术类期刊。创刊于1990年,原刊名《西北水资源与水工程》,2004年更名为《水资源与水工程学报》。国际刊号 ISSN 1672-643X,国内刊号 CN61-1413/TV。

本刊2000年荣获陕西省优秀科技期刊二等奖;2003年荣获首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊奖;2007年全国期刊出版形式规范检查中,获首批A类合格期刊;2007年荣获陕西省优秀期刊奖;2009年荣获陕西省特色科技期刊奖。2012年获陕西省优秀科技期刊奖。2008年成为《中国科技核心期刊》。被科技类核心期刊科技部的“《中国科技核心期刊》数据库”核心库收录,成为中国科技核心期刊;是RCCSE中国核心学术期刊。被《中国科学引文数据库》(CSCD)、《中国科技论文统计与引文分析数据库》、《中文科技期刊数据库》(SWIC)、《中国学术期刊综合评价数据库》(CAJCED)等数据库收录;被《中国农业文摘》、《中国国土资源文摘》、《中国地理科学文摘》等权威性文摘收录。

本刊办刊宗旨是服务经济建设,促进学术繁荣,推动科技进步。力求反映国内外水利科技的最新成果、重要进展、当代水平与发展趋势,加速科研成果向现实生产力转化。主要刊登水资源与水工程领域的有关学术论文、专题述评、区域发展战略与对策,以及水工程、水环境、水质评价等方面的科技成就。

欢迎广大科技工作者投稿!

地址:陕西省杨凌示范区渭惠路23号

邮编:712100

电话:029-87082126

http://www.szyysgxcb.com

E-mail: szysgc@nwsuaf.edu.cn