

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.010

核电站热水生产及分配系统特定温度下 压力波动问题研究

马朝新,薛忠义,黄文浩,张龙洲
(中广核工程有限公司,广东 深圳 518124)

摘要:针对某核电站热水生产及分配系统特定温度下热水泵出口压力波动问题,对该系统热水泵有效汽蚀余量进行了计算,将结果与理论值进行了对比,现场测量了水泵振动数值,并与国标进行了对比;结合气液两相流理论研究了现场管道布置,对系统介质在不同温度下空气溶解度进行了分析,配合流速计算确定了在系统管道流速较低的高点增加排气阀。研究表明,压力波动是由气液两相流型转化产生,空气在不同水温下的溶解度变化导致了该现象仅在特定温度下出现,通过在适当位置增加排气阀可以解决该问题。

关键词:压力波动;有效汽蚀余量;析出气体;气液两相流

中图分类号:TH113.1;O353.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0174-05

Analysis and treatment of a certain nuclear power plant hot water distribution system pressure fluctuation under a certain temperature

MA Chao-xin, XUE Zhong-yi, HUANG Wen-hao, ZHANG Long-zhou
(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China)

Abstract: Aiming at the pressure fluctuation of hot water pump outlet at a specific temperature of hot water production and distribution system in a nuclear power plant, the NPSHA of the hot water pump was calculated and compared with theoretical value, pump vibration value was measured on site and compared with national standard. Based on the theory of gas-liquid two-phase flow, the pipeline layout was studied and the air solubility of the system under different temperature was analyzed. Combined with the flow velocity calculation, vent valve was installed at the high point with low flow velocity of the system pipeline. Results show that pressure fluctuation is caused by the gas-liquid two-phase flow pattern transformation, the solubility of air under different water temperature changes caused this phenomenon only appear under a certain temperature, this problem can be resolved by installing vent valve in the appropriate position.

Key words: pressure fluctuation; net positive suction head available(NPSHA); evolved gas; gas-liquid two-phase flow

0 引 言

某核电站热水生产及分配系统(以下简称热水系统)为闭式循环系统,主要为核岛通风系统及辅助厂房通风系统空间加热器提供热水,以维持各用户房间温度恒定。为保证极端严寒气候条件下也能满足所有用户热量需求,加热器出口水温被设计为恒定 95℃。而在该电站 8 号机组,提升水温到特定温度(44℃左

右)时热水泵出口压力便开始剧烈波动,伴随水泵喘息声及管道振动。目前有关文献主要从热水泵汽蚀引发设备与管道振动^[1]和管道内气液两相流型转化引起压力波动及管道振动^[2]两个方面进行分析,阐释问题发生的内在原理并加以处理。

本研究计算水泵有效汽蚀余量将其与设备必须汽蚀余量对比,从理论上判断是否会出现气蚀现象,对水泵现场实际运行时振动数值进行测量,将结果与国标

收稿日期:2015-08-12

作者简介:马朝新(1987-),男,四川剑阁人,工程师,主要从事核电站热力系统调试方面的研究. E-mail:machaoxin@cgnpc.com.cn

规定进行对比以判断设备是否产生汽蚀。笔者通过勘察现场管道布置查找积气点,分析空气在不同水温中的溶解度得出压力在特定温度下波动的根本原因,最终制定解决方案并予以实施、验证。

1 对系统和电站的危害

管道及其支架和与之相连接的各种设备构成一个复杂的机械结构系统,在有激振力的情况下,系统会产生振动,导致连接管道的振动器械遭受影响和伤害^[3]。如果管道长期处于这种振动状况,振动产生的往复惯性力会导致汽水管道结构的破坏甚至局部泄漏断裂,造成系统不可用。

若振动由空气聚集引起,则可能使水泵的耗能增加。输水管线中气体的存在会导致输水量和压力的不均匀分布,使输水量降低,情况严重时甚至断流。当气阻严重时,由供水压力使生成的压缩空气泡破裂或两气泡融合瞬间产生体积变化,形成瞬间的局部超高压能将管道连接处撑裂^[4]。气体的存在还容易使测量仪表的部件受损、金属管道腐蚀,进而影响水质。

另根据电站运行技术规范,天气寒冷且供热不足可能会触发第一组事件(反应堆硼和水补给系统硼酸管路,包括硼酸箱温度低于 22℃),从而影响机组安全稳定运行。为了保证核电站运行的安全性,技术规范对第一组事件的累积有极其严苛的规定。在不同系统同时出现两个第一组事件累积时,机组开始后撤到后备模式的操作必须按以下规定执行:

- (1) 如果两个事件开始后撤时间较短的一个小于等于 8 h,则在 1 h 内开始执行;
- (2) 如果两个事件开始后撤时间较短的一个大于 8 h 且小于等于 24 h,则在 8 h 内开始执行;
- (3) 如果两个事件的开始后撤时间均大于 24 h,则在 24 h 内开始执行。

考虑到核电站系统众多,因此在机组调试启动阶段,第一组事件的容量是极其有限和宝贵的,任何非必要的第一组事件均有可能增加机组调试启动工期。

2 压力波动原因分析

由于电站热水系统具有管线距离长、水泵扬程高、用户分散、管线走向起伏多的特点,可能引起压力波动的因素众多。本研究所述系统升温过程中特定温度下压力波动现象曲线如图 1 所示。

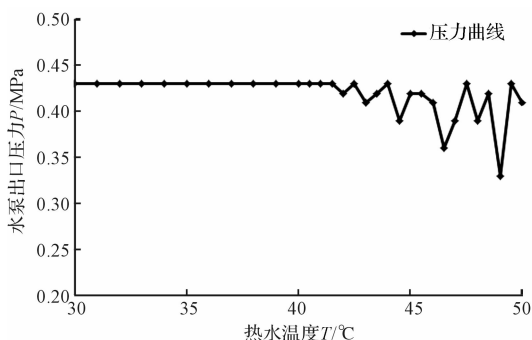


图 1 首次产热水实验温压曲线

笔者主要从热水泵汽蚀和管道内存在气液两相流这两个方面考虑并分析具体的影响因素。

2.1 汽蚀余量计算

水泵内气泡的形成、发展和破裂以致材料受到破坏的过程称为汽蚀现象。气泡本身产生、凝结过程中产生很大的脉动力,如果脉动力的某一频率与设备的自然频率相接近,就会引起泵体以及相邻管道的强烈振动。

当泵的有效汽蚀余量(NPSHA) > 泵的必须汽蚀余量(NPSHR)时能有效避免发生汽蚀现象,通常 $NPSHA > 1.3 NPSHR$ 。热水分配循环泵的型号为 AZ65-200,查设备手册知 $NPSHR = 0.3 \text{ bar}$,符合国家标准 GB13006-91 对泵的汽蚀余量要求。

泵的有效汽蚀余量 NPSHA 是指泵在吸入口的总能量(静压能和动能之和),根据现场实际计算: $NPSHA = \text{泵的入口水柱静压(约 } 5.5 \text{ m 水柱)} + \text{大气压(1 bar)} + \text{液体动能} - \text{工作流体 } 95^\circ\text{C 饱和压力(约 } 0.85 \text{ bar)} - \text{泵入口阻力(临时滤网压降约 } 0.03 \text{ bar)} \approx 0.55 + 1 - 0.85 - 0.03 \text{ bar} = 0.67 \text{ bar}$ 。

根据上述计算,理论上并不存在汽蚀风险。且泵的汽蚀一般伴有剧烈的振动和刺耳的噪音,而现场多次使用测振仪获得泵的振动数据均小于国标规定的 4.5 mm/s 要求。综上分析,本研究排除泵汽蚀引起泵出口压力波动的可能。

2.2 系统积气分析

液体输送管道内部常有气液两相流引起振动的情况出现。在设备运行时,如果管道内部存在气体,这种气体和液体就会形成两相流。根据流型的不同,气液两相流动可能会产生较大的压力波动和管道振动,甚至造成管道破裂^[5]。

输水管线中空气的来源:

(1)管道系统的渗漏、正常维护过程会产生空气。

(2)泵吸入的空气。空气通过吸水管入口处的漩涡进入管线,也可能通过泵体与吸水管的连接处进入。

(3)管线首次通水或因事故停水排空后未能排尽的气体。

(4)当管线中压力下降或温度升高时,水中溶解的空气析出。

(5)水流在经过水泵及管线上的一些附件,压力会发生变化,产生空气。

(6)管道中因水锤或当需水量大于供水量而出现水柱分离时,为防止管线中出现负压而从进排气阀进入的空气^[6]。

首次热水生产实验出现压力剧烈波动后,随即停泵。为避免数据的偶然性,笔者随后又进行了3次试验,试验开始前及试验过程中对综合管廊、核岛连接厂房、燃料厂房及辅助厂房各个排气阀多次进行了排气操作,以排除排气不充分因素。3次试验分别在43.7℃、42.8℃、43.5℃时开始出现热水泵出口压力波动现象。可见,产生压力波动时的水温基本不变,可排除现有排气点排气不充分因素。

当管线存在泄漏点且呈负压状态时,便会将空气吸入。由于现场存在顶部对空的高位水箱,由伯努利方程可知,在热水系统整个闭式循环管线中,静压能、动能和势能之和为定值,回水末端流体静压能也高于大气压,因此,系统中不会存在负压点。

气体易在系统压力较低或流速较低的高处积存^[7-8]。在上坡段,水气运动方向一致,气泡随水流方向前进到管线高点后积聚;水平段,若气泡受到水流冲击力大于管壁摩擦力,则随着水流向前运动,否则滞留在管道上壁;下降段,气和水的运动方向相反,此时气泡不容易被水流带走,且容易聚集在管道的顶部、阀门安装处、管径变化处等位置。因此上坡管段中的气体容易被水流带走,从而排出,下坡管段及水平管段中的气体则不易被排出。

本研究的热水系统在核电站运用中属于辅助系统,其用户广泛分布于电厂各个房间,在核岛厂房内的布置尤其复杂,管道布置优先级低,系统管道可能存较多π型布置。笔者对系统所有管道布置图进行分析,同时结合现场实地勘察共找出一处需要优化的排气阀(①号高点)及两处未加排气阀的π型高点(②、③高点)。①号高点如图2所示,②号高点如图3所示,③号高点如图4所示。

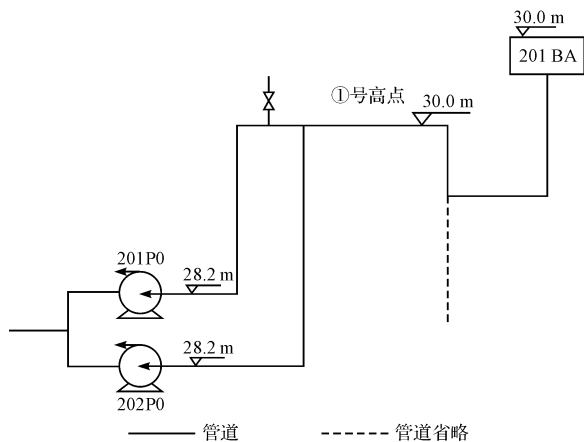


图2 ①号高点

针对①号高点,热水分配循环泵正常运行时,泵出口压力值为3.7 bar,现场测得泵入口的相对压力为0.36 bar。热水泵位于常规岛28 m标高处。查阅设备运行维修手册知泵的最大流量为88.8 m³/h,泵入口管道直径为100 mm,由体积流量的计算公式 $V=4Q_v/\pi d^2$ (假设管道充满水),可得此处最大流速约为3.14 m/s。

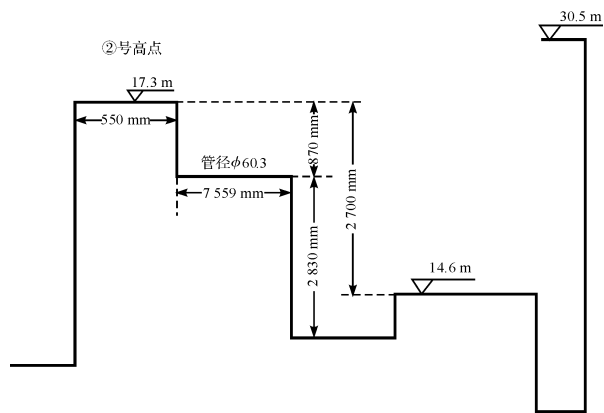


图3 ②号高点

系统在核辅助厂房内的②号高点位于换热器的供回水管道,标高为17.3 m,查阅设计资料获得其管道最大水流量为8.6 m³/h,管道直径为60.3 mm。按照体积流量的计算公式,可得该管段中流体最大流速约为0.84 m/s。

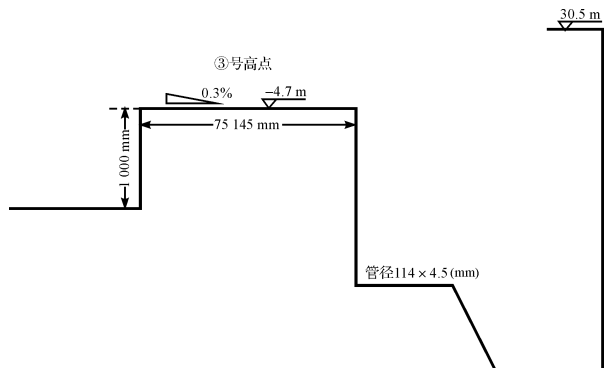


图4 ③号高点

系统在辅助厂房至综合管廊③号高点处,管道压力由读取邻近用户压力表,可知此点相对压力约为6 bar。管段高点的标高约为-4.7 m,查阅设计文件获得该段最大水流量为17 m³/h,管道直径为114 mm。按照体积流量的计算公式可得该管段中流体最大流速约为0.46 m/s。

通过上述计算结果和读取获得的压力值,笔者发现泵入口①号高点处属于流体压力较低的上升管顶部(从廊道最低点到泵入口),原有排气阀由于布置原因不能完全排出回水管道所有气体;核辅助厂房②号高点水平管段长度仅约0.55 m,此处局部阻力较大而容易积气;辅助厂房至综合管廊③号高点管段内水流速较低,亦属于气体易积存点。

然而,系统管道π型布置处存在积气可以解释压力波动现象,却无法解释这一现象为何仅在水温上升到特定温度时出现。现场实验过程中,系统水温45℃时,热水泵排气阀所排出水中含有大量乳白色微小气泡这一特殊现象表明需要在水温变化带来的气体溶解度变化进行分析。

正常大气压下,空气在水中的溶解度随着温度的升高而降低,而空气属于难溶性气体,在当地正常冬季工况下,笔者对该系统热水进行取样,测得氧含量8.9 mg/L,通过查阅资料得到空气在压力为4.1 bar、温度为10℃的水中溶解度约为92 ml/L,在相同压力下45℃的水中溶解度为53 ml/L。随着水温的升高,上述工况的每升水中析出的气体达到39 ml,并且气体析出量在介质输送管道与用户热交换器管道处因温度不同而存在差异。

2.3 小 结

当水温不断升高时,水的密度降低,泵的出口压力不断下降(系统水温升到60℃时,泵出口压力从4.2 bar降到了3.7 bar),同时水的流速也相应地下降,使管道中的气体更容易对系统造成影响。通过分析图1温度上升过程中压力波动曲线可推断,随着温度上升,析出气体不断加剧系统π型布置高点处气体聚集,当积气的热运动达到某一尺度时引发压力剧烈波动,可认为气液两相流的流型在此时发生了转化(现场高点管道内气相和液相的质量、流速等数据处于动态变化,无法获得,因而工作人员无法据此对流型做出准确界定)。

3 解决方案制定

针对前面的分析结果,笔者从管道排气不充分和溶解空气析出两大影响因素入手解决压力波动问题。因热水系统供水的温度范围[60℃,95℃]是确定的,由水温变化引起的溶解度变化客观上无法得到控制。因此本研究针对高点排气制定方案。改造后的热水系统示意简图如图5所示。

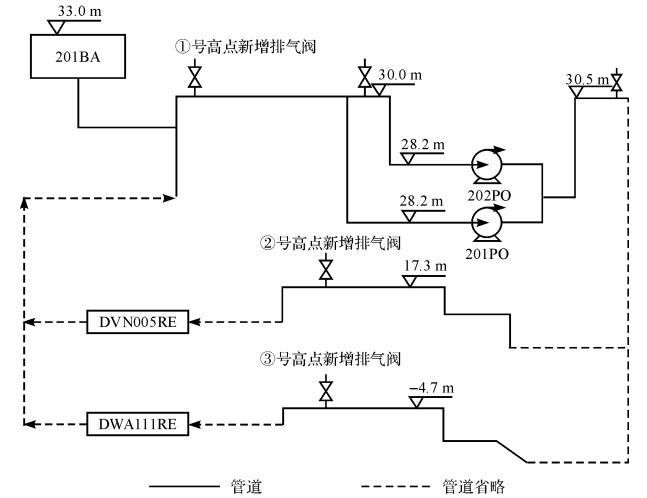


图5 改造后的热水系统示意简图

针对热水生产和分配系统排空气设备,可为手动或自动。目前常见的设备主要有集气罐、排气阀等^[9]。在汇水管处安装空气罐是自动控制气体波动的一种可能途径。热水系统长期运行过程中,不凝结气体逐渐进入空气罐汇集,压缩汇聚的空气从而避免直接冲击管道。但是空气罐体积较庞大,经济成本高。热水系统的局部高点处空间有限,现场布置空气罐安装困难,且空气罐不适用于压力变化范围较大的输水系统。改造考虑的排气阀类型如表1所示。

表1 改造考虑的排气阀类型

名称	类型	型号规格	运行压力/MPa	运行温度/℃	母管直径/mm
高压微量排气阀	自动排气阀	ZP16Q-DN20	1	100	
1号高点新增阀	手动排气阀	J41H-16C	0.87	65	DN100
2号高点新增阀	手动排气阀	SANIWC0020	0.9	95	DN50
3号高点新增阀	手动排气阀	J41H-16C	0.97	95	DN100

排气阀选型需要根据不同运行工况结合管线选定

各区段各自适用的阀型。在管道系统充水过程中,需要排气阀及时快速、大量地排气以消除气阻,保证系统安全,应当选用较大口径的低压高速排气阀;系统正常运行过程中,需要排出液体中析出的气体,此时排气量小且不连续,应选用小口径高压微量自动排气阀^[10-11]。除此之外,还有将二者组合的组合式排气阀,兼有两种排气阀的功能,带有缓冲装置对水锤有防护作用。通常研究人员在长距离输水管道的上坡段选用低压高速排气阀,下坡段使用组合式排气阀,长水平段选用组合式排气阀与高压自动排气阀间隔布置的原则^[12]。由于核电站热水系统不同于普通民用系统,核岛区域和辅助厂房区域都属于控制区范围,如果采用自动排气阀,排出的气体及其夹带的水珠存在污染控制区风险。手动排气阀具有工作可靠、排出汽水混合物易控制的优势,同时考虑到本研究涉及的几处高点落差较大,积气较多,因而手动排气阀排气次数并不会很多。最终,本研究确定在①号高点回水母管最高点处、②号和③号高点处增加手动排气阀。

4 实验结果及分析

方案实施后再次进行了热水生产实验:实验开始前确认所有排气阀都已经完成排气操作,在水温升高到 40℃ 左右时暂停升温并对新增排气阀和原有排气阀进行排气操作,随后每间隔一段温度(20℃)打开排气阀排气,最终成功将系统水温提高至设计最高温度(95℃)且热水泵出口未出现压力波动现象。

对比系统改造前后的实验结果可知:

(1) 出现压力波动现象的原因是系统管道高点积气不断增加时发生的气液两相流型转化而非热水泵汽蚀。

(2) 压力波动现象仅在特定温度下出现的原因是温度上升后溶解在水中的气体析出并累积到了一定程度。

(3) 本研究对系统管道易积气点位置分析准确,新增手动排气阀效果可靠。

5 结束语

本研究介绍了某核电站热水系统特定温度下压力波动问题的具体现象,通过现场勘察并结合水泵汽蚀、气液两相流理论分析了压力波动的内在原理,在合适位置增加了手动排气阀。结果表明,新增排气阀能够将管段高点不断聚集的析出气体排出,阻止气液两相流型的转化,从而避免引发系统压力波动。该问题的解决为各电站同类型系统的调试启动和运行维护提供了新的思路,同时也为热水系统设计者提供了借鉴与参考。

参考文献(References):

- [1] 毛悠仁,刘江涛. 离心泵汽蚀产生原因分析及防止措施[J]. 浙江化工,2006,37(8):31-32.
- [2] 王豪杰. 长距离输水管道气液两相流型实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学市政环境工程学院,2013.
- [3] 周云,刘季. 管道振动及其减振技术[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1997,24(5):108-114.
- [4] DL/T 5054-1996. 火力发电厂汽水管道设计技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [5] 谢超. 气液两相流管道振动特性研究[D]. 东营:中国石油大学(华东)机械学院,2010.
- [6] 阎昌琪. 气液两相流[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009.
- [7] 臧贻娟. 新型双作用气液增压系统设计与分析[J]. 液压气动与密封,2013(9):57-58.
- [8] 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):24-25.
- [9] 胡建永,张健,祁舵. 长距离输水系统中空气阀的运行特性研究[J]. 水力发电,2007,33(10):61-63.
- [10] 谭琴,张全圈,廖雪丽,等. 滚动转子压缩机工况对排气阀运动规律影响研究[J]. 流体机械,2014,42(9):25-29.
- [11] 杨玉思,王彤. 关于长距离输水管排气阀选择问题的建议[J]. 给水排水动态,2005(4):30-32.
- [12] 李菊仙,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.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

马朝新,薛忠义,黄文浩,等. 核电站热水生产及分配系统特定温度下压力波动问题研究[J]. 机电工程,2016,33(2):174-178.

MA Chao-xin, XUE Zhong-yi, HUANG Wen-hao, et al. Analysis and treatment of a certain nuclear power plant hot water distribution system pressure fluctuation under a certain temperature[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(2):174-178.