

文章编号:1006-1355(2015)03-0208-03

# 核电厂管道振动原因分析及对策

胡士光, 沈小要

(上海核工程研究设计院 工程设备所, 上海 200233)

**摘要:**管道是核电厂主要的组成部份。核电厂管道的振动往往引起管道的振动疲劳,长期积累致使管道开裂,严重时核电厂被迫停堆检修,甚至造成灾难性事故。为了减少此类事件的发生,本文总结了诱发核电厂管道振动的主要原因,有旋转设备的振动、水锤、流体脉动、气蚀、气液两相流、风载荷、地震载荷和人为误差等几种,并列出了相关事件案例,提出了常见的整改方案。本文旨在为核电厂管道的设计、建造、维护与整改等工作提供必要的参考依据。

**关键词:**振动与波;核电厂;管道;原因分析;整改

中图分类号:TB4

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.03.045

## Cause Analysis of Pipeline Vibration in Nuclear Power Plants and Its Improvement Strategies

HU Shi-guang, SHEN Xiao-yao

(Engineering Equipment Department, Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Pipeline is the main component of nuclear power plants. Pipeline vibration can induce fatigue and fracture of the pipeline. Accumulation of the cracks of the pipeline can cause the power plant to shut down, maintenance, and even catastrophic accidents. In this paper, the main reasons inducing the vibration of the pipeline in nuclear power plants, such as the vibration of rotating equipment, hydraulic hammering action, fluid pulsation, cavitation corrosion, gas liquid two-phase flow, wind, earthquake and artificial error were summarized. Some accident cases and common improvement schemes were introduced. This work may provide some necessary references for pipeline design, construction, maintenance and overhaul in nuclear power plants.

**Key words:** vibration and wave; nuclear power plant; pipeline; cause analysis; improvement

振动是核电厂管道失效的一个主要原因,严重时诱发多起事故,被迫停堆检修。1986年美国Surry核电厂二回路高能碳钢管线振动诱发泄露,引起人员伤亡事故<sup>[1]</sup>;1987年12月,美国Farley核电站2号机高压安注管线振动开裂,诱发泄露事故;1988年6月,美国Genkai核电站余热去除系统与主管道相接管线发生振动开裂;1995年9月,美国三里岛核电站1号机主管道冷段疏水管振动开裂<sup>[2]</sup>。此外,美国电力研究院统计,1970—1999年间,全球核电厂管道由于振动诱发的失效的案例有54起<sup>[3]</sup>。1991年,法国Belleville核电厂2号机组安全注入系统(RIS)2个小

支管焊缝发生振动开裂,法国电力公司(EDF)同类CPY机组也曾发生类似焊缝振动开裂事件<sup>[4]</sup>。2003年6月,秦山地区某核电站1号机组稳压器喷淋管线在靠近稳压器进口管嘴附近发生振动开裂,2013年2月,2号机组该管线同类位置也发生了振动开裂<sup>[5]</sup>。振动导致管道疲劳开裂,严重时诱发泄露,造成停堆检修,所以核电厂振动问题已经引起国内外研究人员的广泛重视<sup>[6,7]</sup>。本文将针对核电厂现场中常见的失效案例,总结管道振动的主要原因,为核电厂的建设和现场的整改施工,提供必要的理论指导。

### 1 旋转设备诱发的振动

旋转机械是核电厂的关键设备,传递给与之相连的管道上的激振力是管道振动的主要激励源之一。对于秦山600 MW核电厂1号机组的16个系统228个点位的管道振动进行测量,其中6.6%点位的振动超限,在2号机组16个系统167个点位中,有

收稿日期:2015-02-07

作者简介:胡士光(1978—),男,辽宁大连人,本科,主要研究方向:核电厂非标设备设计。

E-mail: propose@snerdi.com.cn

通讯作者:沈小要,男,安徽宿州人,博士,高级工程师,主要研究方向:反应堆结构力学。

E-mail: shenxy@snerdi.com.cn

4.2%的点位超限,主要在设冷水系统,而与它们相连的旋转设备中有10%的振动略大,为C级<sup>[6]</sup>。大亚湾和岭澳核电站投运以来,冷凝泵多次发生振动高报警,启动后管系振动大<sup>[8]</sup>。

核电厂实际运行阶段发现旋转设备产生振动的原因,大多数来源于地面基础刚度不足、轴承磨损、质量偏心、楼面刚度不足以及动平衡等。另外,核电厂中旋转机械设备所用的材料不均匀、制造过程存在的误差、旋转过程中受到磨损以及外界的腐蚀作用等,会使旋转机械转动部分在运转过程中重心偏离正常轴线。

旋转设备的振动在核电厂广受关注,除了其自身振动超标,旋转设备的振动也往往会引起管道的振动,引起疲劳开裂,严重时造成灾难性事故。为了减少旋转设备导致的振动,需要从旋转设备设计、安装方面做好工作。在上述2号机组16个系统167个点位中,经过对相连旋转设备设计改进后,振动有明显下降,全部满足要求<sup>[6]</sup>。

## 2 流体脉动产生的振动

管道内流体参数(压力、速度、密度等)随时间、位置呈周期性变化的现象称为“流体脉动”,内部的流体输送是通过泵对其进行间歇式加压实现。由于这种间歇式的加压方式,管道内部的流体压力在某一稳定值上下脉动,当处于脉动状态的流体流经弯管、异径管、调节阀、节流孔板等管道部件时,产生随时间变化的激振力,引起管道及其附属设备发生振动<sup>[9]</sup>。实际工程中经常会遇到由于流体脉动作用而诱发结构振动损伤。谢永城<sup>[10]</sup>等发现在主蒸汽旁排阀一般情况下,振幅为0.325 mm,当旁排阀处于某一开度时,振动会剧增至5.7 mm,这也是高速蒸汽流引起管道共振。又如核级热交换器是核辅助系统的重要设备,其壳侧流体引起传热管的振动,会使传热管产生疲劳破坏。据相关调查发现,将近有40%多的核电厂发生蒸汽发生器和热交换器传热管的振动疲劳破坏事故,导致计划外停堆。另外,核电厂稳压器排放管振动属于典型的瞬态振动,其安全阀组件上游管中有水塞,当安全阀组件在很短时间内打开时,水塞受蒸汽推动下不断加速而引起排放管发生较大的瞬态振动<sup>[11]</sup>。

为了减少流体脉动产生振动需要从管路的选型、管路的布置、减少气柱谐振三个方面考虑。

## 3 水锤冲击产生的振动

当管道中的阀门突然启闭或者水泵的突然开停,管道内的水流速度首先在阀门处发生突变,使管

道内水压形成压缩波和膨胀波,并在管道内周期性的传递衰减,直至压力稳定,这种现象称为水锤。水锤从不同角度可分为四类:按关阀历时与水锤相的关系分为直接水锤和间接水锤;按水锤成因的外部条件可分为启动水锤、关阀水锤和停泵水锤;按水锤水力特性可分为刚性水锤理论和弹性水锤理论两种;按水锤波动的现象分为水柱连续现象和水柱分离的水锤现象两种。

水锤现象严重影响了核电厂的安全生产。据有关资料介绍<sup>[12]</sup>,三回路发生的水锤事故约占压水堆核电厂水锤事故的9%,意外停电或机械故障造成水泵突然停止运行是导致三回路水锤事故发生的主要原因。在华东、中南等4个地区有30多个较大泵站,都发生过水锤现象,记录到损失较大的事故多达200次以上。

水锤防护措施现场通常有三种:补水(注气)稳压,防止产生水柱分离或升压过高的断流弥合水锤;泄水降压,避免压力陡升;使用多功能水泵控制阀。

## 4 气蚀诱发管道的振动

在核电厂管道系统设计中,大量采用节流孔板来增加系统阻力,限制管道流速。目前,关于节流孔板的设计和分析还没有标准化要求,在设计过程中通常是依据设计者的经验以及一些实验室得出的经验公式,这样设计出的节流孔板容易造成节流孔板过度节流,在节流孔板下游发生气蚀现象,引起管道振动和噪声,给核电厂安全带来不利影响<sup>[13]</sup>。大亚湾核电站安全壳喷淋系统(EAS)试验管线节流孔板气蚀引起的管道剧烈振动和噪声<sup>[14]</sup>,神华广东国华粤电台山发电有限公司600 MW机组在启动过程中,凝结水通过再循环调节阀时,出现气蚀诱发再循环管道出现较大的振动<sup>[15]</sup>。

对于气蚀现象的治理主要从根源做起,比如优化节流孔板,改进调节阀等。中国核动力研究设计院的张毅熊等人按气蚀数相近的原则设计多级节流孔板,并结合EAS实验对管线孔板气蚀引起的振动进行了分析和改造,有效解决了核电厂中由于节流孔板气蚀引起的管道振动问题<sup>[13]</sup>。

## 5 气液两相流产生的振动

气液两相流动是指在同一流动体系中,同时存在气相和液相两种流动介质的流动现象。气液两相流体在管道中输送时流动形态复杂多变,各不相同,可形成多种流型,各处的密度不完全相同,在流体流动速度和流动方向发生变化时会引起管道系统的剧烈振动。

气液两相流在石化厂、炼油厂和核反应堆等装置相关管系里的应用非常普遍。例如动力工程中锅炉蒸发管中的蒸汽/水两相流动,化工工业中物料输送管道和反应釜搅拌器中的气液两相流等。当气液两相流存在与外界的热交换时,流体吸收或散热,气液比发生变化,在局部会产生流体冲击;尤其是存在向外散热的情况时,流体中的介质蒸汽可局部冷凝,其体积在瞬间发生很大的变化,附近液流高速移动占据这个空间,形成冲击引起振动。同时,气液两相流因各相密度和速度差异,导致各处流动形态不完全相同,在遇到弯头、异径管、三通、喷嘴等元件时,由于压力和动量矢量的变化,会对管道产生激振力而引起振动。

气液两相流动诱发管道振动问题已有很多相关报道<sup>[15,16]</sup>。

## 6 风载荷、地震载荷引起的振动

### 6.1 风力引起的振动

室外管道当空气横流绕过其非流线型的外表面时,在空气流的尾流中就可能出现不对称旋涡,从而激扰管道系统振动。大振幅的振动是出现在涡街频率与管道的固有频率相接近时。

### 6.2 地震引起的振动

地震也会引起管道的随机振动。

同与管道连接的设备相比,管道质量较轻、体积较小,当地震发生时,管道会振动。但是,由于地震导致管道破坏的可能性很小,往往地震时管道破坏的原因多为设备或管道支架的坍塌联动,对管道施加应力引起的。

因此,对于风载荷、地震载荷振动的防护,主要要从核电厂的建造设计着手。

## 7 人为因素引入的管道振动

设计、制造、安装和调试过程,也是引入管道振动的一个原因。比如管道设计不合理,如果管道设计刚度小、固有频率低或布置过于复杂,管道容易受激振力的影响而发生共振;或者支吊架布置不合理,其主要表现为管路及其支吊架的摆动并伴有“碰碰”的噪声,振动的时间多发生在启停机和变工况的时候,振动位置多发生在主蒸汽管道、高低之间正常疏水和危急疏水管路、水泵的出入口管路及再循环管路,高温高压容器或主蒸汽管道的有压放水主管等管路;比如调节阀选型和安装不合理,调节阀出口处易发生汽蚀,管道内部流体产生汽水两相流使流动失去稳定性,强大的冲击力会引起管道振动。

## 8 结语

核电厂管道的振动是一个比较复杂的问题,引起振动的原因也很多,本文总结了旋转设备、水锤、流体脉动、气蚀、气液两相流、风载荷、地震载荷和人为误差等诱发核电厂管道振动的几种主要原因,并列出了相关案例,提出了常见的整改方案。研究发现,为了解决核电厂管道的振动问题,需要在设计、加工、安装、调试、运行等几个环节做好相应的工作。

参考文献:

- [1] 窦一康. 核电厂生命周期全过程的老化管理[J]. **金属热处理**, 2011, 36(S1): 10-14.
- [2] 陈银强, 张蜀治, 周正平, 等. 稳压器波动管热分层现象三维数值模拟研究[C]. 核电站寿命评价与管理技术研讨会, 2010(12): 522-527.
- [3] 谭璞, 李剑波. 核电厂管道疲劳机理与防治[J]. **核安全**, 2011(4): 23-28.
- [4] IAEA-TECDOC-1361 Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components impartment to safety-primary piping in PWRs[R]. IAEA, 2003, 6.
- [5] 彭顺米. 原子能院堆工所开展的核电厂构件设备失效分析工作介绍[C]. 2013年国内核电厂失效分析交流会, 海盐, 浙江, 2013.
- [6] 谢永诚, 梁星筠, 杨仁安, 等. 核电厂管系和旋转设备振动故障诊断技术研究及其应用[J]. **核动力工程**, 2006(10): 273-275.
- [7] Orynyak I V, Batura A S, Radchenko S A, et al. Application of the method of initial parameters to analysis of coupled hydromechanical vibrations in piping systems-Part 3. Analysis of forced vibrations in steam piping of WWER-1000 power unit[J]. **Strength of Materials**, 2012, 44(2): 196-204.
- [8] 张新华, 朱健. 核电站冷凝泵的水锤危害分析[J]. **水泵技术**, 2008(4): 27-32.
- [9] 何超, 袁少波, 喻丹萍. 核电厂管系振动评定方法分析[J]. **核动力工程**, 2011, 32(S1): 107-109.
- [10] 管欣, 林磊, 逄文新, 等. 核电站管道运行强度测试分析与评估[J]. **噪声与振动控制**, 2009, 29(6): 19-21.
- [11] 吴栋, 江丽. 核电厂泵站水锤现象的形成与危害分析[J]. **应用科学**, 2010(4): 97-99.
- [12] Rober Son J A, Crowe C T. Engineering fluid mechanics [M]. 6 th Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1997.
- [13] 张毅雄, 毛庆, 向文元, 等. 多级节流孔板在核级管道中的设计分析研究[J]. **核动力工程**, 2006(10): 301-303.
- [14] 李春伟, 唐璐. 600 MW 机组凝结水再循环管道振动原因分析及处理[J]. **内蒙古电力技术**, 2012, 30(1): 117-119.
- [15] Pettigrew M J, Taylor C E. Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: an overview- Part 1: flow, damping, fluidelastic instability[J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2003, (18): 469-483.
- [16] 谢超. 气液两相流管道振动特性研究[D]. 中国石油大学, 2010.